

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26

2020

№ 6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

САПР

КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА

МЕТОДЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

ОПЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДЫ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

НЕЙРОСЕТИ И
НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

ОПТИМИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ИТ В ОБРАЗОВАНИИ

ГИС

Рисунки к статье А. А. Дубанова

«МОДЕЛЬ ГРУППОВОГО ПРЕСЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНОЙ ЦЕЛИ НА ОСНОВЕ СЛЕДОВАНИЯ РАНЕЕ ПРОГНОЗИРУЕМЫМ ТРАЕКТОРИЯМ»

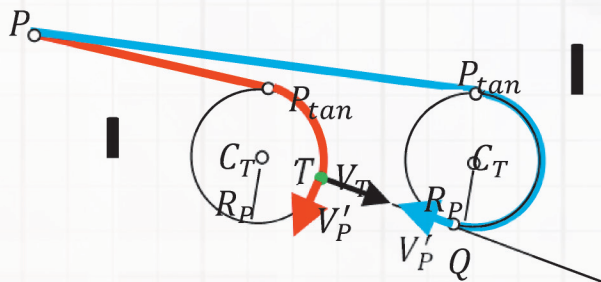


Рис. 9. Стратегия преследователя «из засады»

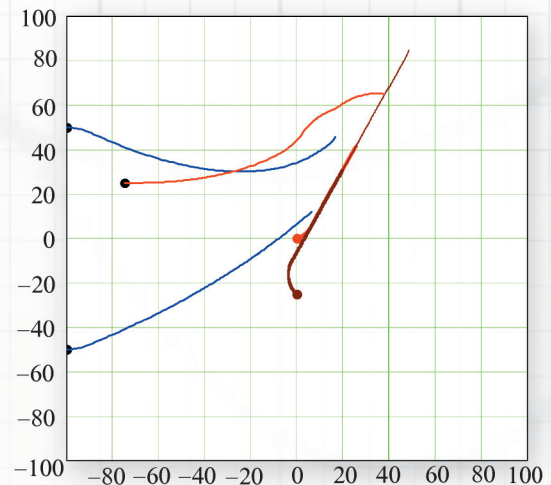


Рис. 12. Результат моделирования группового преследования одиночной цели

Рисунок к статье А. Г. Карамзиной

«СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

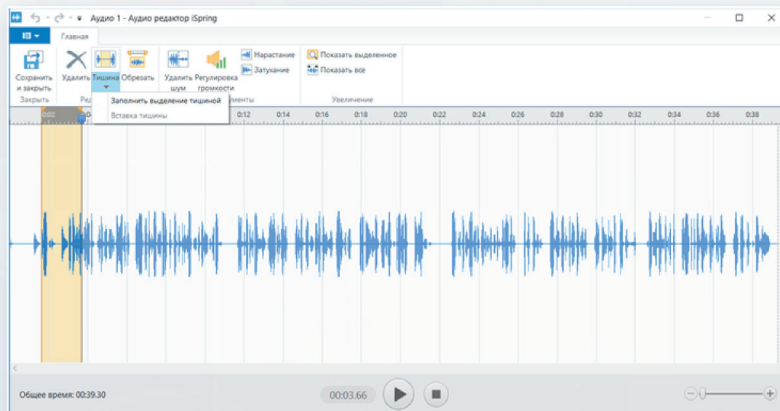


Рис. 6. «Аудиоредактор»
настройки iSpring Suite

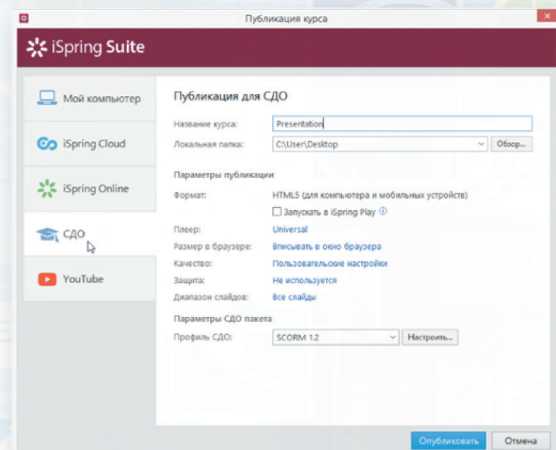


Рис. 7. Окно
«Публикация курса»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Том 26
2020
№ 6

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с ноября 1995 г.

DOI 10.17587/issn.1684-6400

УЧРЕДИТЕЛЬ

Издательство "Новые технологии"

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Марковские и полумарковские процессы с нечеткими состояниями. Часть 1. Марковские процессы . . . 323
- Дубанов А. А. Модель группового преследования одиночной цели на основе следования ранее прогнозируемым траекториям . . . 334

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Акопов А. С., Бекларян Л. А., Хачатрян Н. К., Бекларян А. Л., Кузнецова Е. В. Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами . . . 342

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

- Крахмалев О. Н. Алгоритмизация параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов . . . 354

БАЗЫ ДАННЫХ

- Шилов И. М., Заколдаев Д. А. Многомерный блокчейн и его преимущества . . . 360

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

- Карамзина А. Г. Современные информационные технологии в образовательном процессе технического университета . . . 368
- Астахова Т. Н., Косолапов В. В., Романова А. А., Кондурцова Т. М. Разработка информационной системы автоматизации процесса формирования и согласования индивидуальных планов научно-педагогических работников . . . 377

Главный редактор:

СТЕМПКОВСКИЙ А. Л.,
акад. РАН, д. т. н., проф.

Зам. главного редактора:

ИВАННИКОВ А. Д., д. т. н., проф.
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с.н.с.

Редакционный совет:

БЫЧКОВ И. В., акад. РАН, д. т. н.
ЖУРАВЛЕВ Ю. И.,
акад. РАН, д. ф.-м. н., проф.
КУЛЕШОВ А. П.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ПОПКОВ Ю. С.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
РУСАКОВ С. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
РЯБОВ Г. Г.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
СОЙФЕР В. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СОКОЛОВ И. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
СУЕТИН Н. В., д. ф.-м. н., проф.
ЧАПЛЫГИН Ю. А.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ШАХНОВ В. А.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.
ШОКИН Ю. И.,
акад. РАН, д. т. н., проф.
ЮСУПОВ Р. М.,
чл.-корр. РАН, д. т. н., проф.

Редакционная коллегия:

АВДОШИН С. М., к. т. н., доц.
АНТОНОВ Б. И.
БАРСКИЙ А. Б., д. т. н., проф.
ВАСЕНИН В. А., д. ф.-м. н., проф.
ВАСИЛЬЕВ В. И., д. т. н., проф.
ВИШНЕКОВ А. В., д. т. н., проф.
ДИМИТРИЕНКО Ю. И., д. ф.-м. н., проф.
ДОМРАЧЕВ В. Г., д. т. н., проф.
ЗАБОРОВСКИЙ В. С., д. т. н., проф.
ЗАРУБИН В. С., д. т. н., проф.
КАРПЕНКО А. П., д. ф.-м. н., проф.
КОЛИН К. К., д. т. н., проф.
КУЛАГИН В. П., д. т. н., проф.
КУРЕЙЧИК В. В., д. т. н., проф.
ЛВОВИЧ Я. Е., д. т. н., проф.
МАРТЫНОВ В. В., д. т. н., проф.
МИХАЙЛОВ Б. М., д. т. н., проф.
НЕЧАЕВ В. В., к. т. н., проф.
ПОЛЕЩУК О. М., д. т. н., проф.
ПРОХОРОВ С. А., д. т. н., проф.
САКСОНОВ Е. А., д. т. н., проф.
СОКОЛОВ Б. В., д. т. н., проф.
ТИМОНИНА Е. Е., д. т. н., проф.
УСКОВ В. Л., к. т. н. (США)
ФОМИЧЕВ В. А., д. т. н., проф.
ШИЛОВ В. В., к. т. н., доц.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу <http://novtex.ru/IT>.
Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования и базу данных RSCI на платформе Web of Science.
Журнал входит в Перечень научных журналов, в которых по рекомендации ВАК РФ должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

INFORMATION TECHNOLOGIES

INFORMACIONNYYE TEHNOLOGII

Vol. 26
2020
No. 6

THEORETICAL AND APPLIED SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Published since November 1995

ISSN 1684-6400

CONTENTS

MODELING

- Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A.** Markov and Semi-Markov Processes with Fuzzy States. Part I. Markov Processes 323
- Dubanov A. A.** Model of Group Pursuit of a Single Target Based on Following Previously Predicted Trajectories 334

INTELLIGENT SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

- Akopov A. S., Beklaryan L. A., Khachatryan N. K., Beklaryan A. L., Kuznetsova E. V.** Multi-Agent Control System for Unmanned Ground Vehicles 342

SOFTWARE ENGINEERING

- Krakhmalev O. N.** Algorithmization of Parallel Computing in a Dynamic Model of Robot Manipulation Systems 354

DATABASE

- Shilov I. M., Zakoldaev D. A.** Multidimensional Blockchain and its Advantages .. 360

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATION

- Karamzina A. G.** Modern Information Technologies in the Educational Process of a Technical University 368
- Astakhova T. N., Kosolapov V. V., Romanova A. A., Kondurtsova T. M.** Development of an Information System for Automate the Process of Formation and Coordination of Individual Plans of Scientific and Pedagogical Workers 377

Editor-in-Chief:

Stempkovsky A. L., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Deputy Editor-in-Chief:

Ivannikov A. D., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Filimonov N. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Chairman:

Bychkov I. V., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zhuravljov Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kuleshov A. P., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Popkov Yu. S., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Rusakov S. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ryabov G. G., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Soifer V. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov I. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Suetin N. V.,
Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Chaplygin Yu. A., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shakhnov V. A., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shokin Yu. I., Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Yusupov R. M., Corresp. Member of RAS,
Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Editorial Board Members:

Avdoshin S. M., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Antonov B. I.
Barsky A. B., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vasenin V. A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Vasiliev V. I., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Vishnekov A. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Dimitrienko Yu. I., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Domrachev V. G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zaborovsky V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Zarubin V. S., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Karpenko A. P., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
Kolin K. K., Dr. Sci. (Tech.)
Kulagin V. P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Kureichik V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Ljvovich Ya. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Martynov V. V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Mikhailov B. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Nechaev V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.
Poleschuk O. M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Prokhorov S. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Saksonov E. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Sokolov B. V., Dr. Sci. (Tech.)
Timonina E. E., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Uskov V. L. (USA), Dr. Sci. (Tech.)
Fomichev V. A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.
Shilov V. V., Cand. Sci. (Tech.), Ass. Prof.

Editors:

Bezmenova M. Yu.

Complete Internet version of the journal at site: <http://novtex.ru/IT>.

According to the decision of the Higher Certifying Commission of the Ministry of Education of Russian Federation, the journal is inscribed in "The List of the Leading Scientific Journals and Editions wherein Main Scientific Results of Theses for Doctor's or Candidate's Degrees Should Be Published"

Н. П. Деменков, канд. техн. наук, доц., e-mail: dnp@bmstu.ru,

Е. А. Микрин, д-р техн. наук, проф.,

И. А. Мочалов, д-р техн. наук, проф., e-mail: intelsyst@mail.ru,

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Марковские и полумарковские процессы с нечеткими состояниями. Часть 1. Марковские процессы

Для дискретно-непрерывного случайного процесса Маркова сформулирована и решена задача об уменьшении размерности матричной задачи Коши для матричного уравнения Колмогорова путем введения нечетких состояний с использованием близости этого уравнения матричному разностному уравнению. Решены простейшие задачи надежности и массового обслуживания, с помощью которых продемонстрирована предложенная методика применения техники введения нечетких состояний, позволяющая уменьшить размерность исходной задачи.

Ключевые слова: нечеткие состояния процесса Маркова, модели надежности и массового обслуживания с нечеткими состояниями

Введение

Случайные процессы играют важное значение при рассмотрении различных математических моделей для многих физических, биологических и технических систем. Среди множества их типов особое место занимают марковские случайные процессы, поскольку математический аппарат для них хорошо разработан, а основанные на них модели для анализа реальных процессов являются достаточно простыми. Аппарат теории марковских процессов широко используется в различных прикладных направлениях науки и техники, таких как радиотехника, автоматика, теория надежности электронных устройств, теория массового обслуживания, физика, биология и др. Обычно случайные процессы являются одной из возможных математических моделей в представлении неопределенности в описании некоторых физических явлений. Для марковского случайного процесса полагается, что его модель может быть представлена в виде стохастического дифференциального уравнения в частных производных параболического типа относительно плотности вероятности процесса. В одномерном случае оно трансформируется в различные модификации: цепи, дискретно-непрерывные

процессы, последовательности и одномерные непрерывные процессы, описываемые разностными, обыкновенными стохастическими дифференциальными уравнениями и т.д. [1, 2].

Такое представление неопределенности не является единственно возможными. В настоящее время для этих целей широко используется теория нечетких множеств, которая появилась по результатам работ Л. Заде. В частности, разработана теория решения нечетких систем линейных алгебраических уравнений (НСЛАУ) и их модификаций в виде полных систем и систем неполного ранга [3–5]. Отмечается, что НСЛАУ при определенных условиях имеют "сильные/слабые" решения. В работе [6] решена задача нечеткого оценивания по методам моментов, максимального правдоподобия и наименьших квадратов и показано появление "сильных/слабых" оценок. Создана теория решения нечеткой начальной задачи первого порядка [7, 8]. Показано, что при определенных условиях она имеет два типа решения — Buckley—Feuring (BF) и Seikkala (S). Решены нечеткие дифференциальные уравнения в частных производных первого и второго порядков, когда они могут быть трансформированы в уравнения первого порядка, и далее для них также могут быть получены два типа решений, упо-

мянутые выше. Эта теория реализуется для синтеза нечеткого ВФ- и S-регуляторов и анализа нечеткой системы автоматической оптимизации (САО), реализованной на основе экстремального регулятора (ЭР) с запоминанием экстремума [9]. Показано, что нечеткая САО является многократной системой кратности континуум [10]. Для представления нечеткой начальной задачи n -го порядка используется производная Нуканга и далее анализируются колебательные процессы в волновом твердотельном гироскопе [11]. В работах [12, 13] представлено нечеткое преобразование Лапласа, с помощью которого решаются нечеткие краевые задачи для дифференциального и интегрального уравнений. В работах [14–18] определяется нечеткая передаточная функция и даются нечеткие фазовые траектории для нечетких систем различных типов, с помощью которых решаются простейшие задачи устойчивости. Можно полагать, что перечисленные выше работы создают предпосылки в представлении элементов теории нечеткого управления, являющейся обобщением соответствующих классических разделов теории управления.

Для нечетких вероятностей, математической статистики, случайных процессов различных типов представлены алгоритмы управления в автоматизированных системах и анализ импульсных САО с помощью нечетких цепей Маркова [19].

Цель настоящей работы состоит в разработке методики, связывающей нечеткие и четкие состояния цепи Маркова для описания нечетких состояний дискретно-непрерывного процесса Маркова, которая реализуется для оценок надежности и систем массового обслуживания.

Новизна работы состоит в использовании известного соотношения для цепей Маркова [19, 20] при уменьшении размерности систем дифференциальных уравнений процесса Маркова путем введения для них нечетких состояний.

1. Постановка задачи

Пусть имеем разностные уравнения, представляющее четкую цепь Маркова:

$$P(n+1) = P(1)P(n), \quad P(0) = P_0, \quad EP(n) = 1, \quad (1)$$

где $P(1)$ — переходная матрица за один шаг для четких состояний цепи; $P(n)$ — вектор четких состояний цепи на n -м такте; $P(0)$ — вектор начальных условий; E — матрица, все элементы которой равны 1.

Будем полагать, что переход к нечетким состояниям цепи (1) осуществляется путем задания соотношения [19]

$$P_f(1) = \Delta \Gamma^T P(1) \Gamma, \quad (2)$$

где Γ — матрица функций принадлежности; Δ — диагональная матрица, связанная с начальными условиями.

Для дискретно-непрерывного процесса Маркова, заданного векторным уравнением Колмогорова, уравнения имеют вид

$$\dot{P}(t) = \Lambda_k P(t), \quad P(t=0) = P_0, \quad EP(t) = 1, \quad (3)$$

где Λ_k — матрица уравнений Колмогорова с четкими состояниями; $P(t)$ — вектор вероятностей нахождения системы в четких состояниях; P_0 — вектор начальных условий.

Относительно задачи Коши для матричного уравнения Колмогорова и при любом векторе начальных состояний системы имеет место неотрицательность компонент решения, которое также удовлетворяет условию нормировки. Необходимо найти аналог (3) с нечеткими состояниями.

2. Метод решения

Метод решения состоит в приближенном равенстве четкого марковского дискретно-непрерывного процесса (3) и четкой цепи Маркова (1) при достаточно малом промежутке времени Δt . Действительно, из уравнений (1) следуют соотношения (3):

$$\begin{aligned} \dot{P}(t) &= \Lambda_k P(t), \Rightarrow P(n+1) - P(n) = \\ &= \Delta t \Lambda_k P(n) + 0(\Delta t) \Rightarrow \\ \Rightarrow P(n+1) &\approx P(1)P(n), \quad P(1) = I + \Delta t \Lambda_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где I — единичная матрица.

Обратно, из соотношений (3) следуют уравнения (1):

$$\begin{aligned} P(n+1) &= P(1)P(n) \Rightarrow P(n+1) - P(n) \Rightarrow \\ \Rightarrow P(n+1) - P(n) &= P(1)P(n) - P(n) \Rightarrow \\ \Rightarrow \dot{P}(t) &= \Lambda_k P(t), \quad \Lambda_k = [P(1) - I]\Delta t^{-1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Очевидно, чем меньше будет шаг Δt , тем точнее будет равенство уравнений (1) и (3). В результате может быть сформулировано следующее правило получения нечетких состояний для дискретно-непрерывного марковского процесса.

2.1. По графу $\Sigma_{д-н}$ дискретно-непрерывного процесса записывается матрица состояний Δ_s и далее с использованием этой матрицы записывается векторное уравнение (3) с матрицей Δ_k . На основе полученной матрицы Δ_k и соотношений (4) находится матрица $P(1)$ за один шаг марковской цепи. Далее возможны следующие варианты.

2.2. *Вариант 1.* По найденному значению $P(1)$ из п. 2.1 задается матрица Δ начальных условий уравнения (1) и матрица Γ , связанная с дискретными функциями принадлежности, задающие нечеткие состояния "f", и затем по соотношению (4) находится переходная матрица $P_f(1)$ за один шаг для нечетких состояний и далее с точностью до обозначений по разностному уравнению (1) находится $P(n)$.

2.3. *Вариант 2.* По $P_f(t)$ с учетом (5) находится матрица Λ_{fk} Колмогорова, которая задает модель дискретно-непрерывного процесса с нечеткими состояниями и затем по соотношениям (4) находится $P_f(t)$.

В зависимости от способа задания матриц Λ_s , Γ , Δ будем иметь различные типы нечетких моделей в представлении сложных систем.

3. Модель гибели—размножения с нечеткими состояниями

При анализе процессов изменения численности биологических популяций, распространения эпидемий, прогнозировании экономических показателей и других проблем широко используется четкая модель гибели—размножения (г—р), для которой на рис. 1 представлен граф $\Sigma_{д-н}$.

По графу записывается матрица Λ_s для четких состояний. На главной ее диагонали элементы $\lambda_{ii} = 0, i = \overline{1, n}$, а наддиагональные и поддиагональные элементы соответственно равны $\lambda_{i,i+1}, \lambda_{i+1,i}, i = \overline{1, n-1}$, поэтому Λ_s будет иметь вид

$$\Lambda_s = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & \dots & X_{n-1} & X_n \\ \begin{pmatrix} 0 & \lambda_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & 0 & \lambda_{23} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_{n-1,n} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_{n-1,n} & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{pmatrix} \end{pmatrix} \left. \vphantom{\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{pmatrix}} \right\} \text{— четкие состояния.}$$

В соответствии с известными правилами составления уравнений Колмогорова по матрице Λ_s получается матрица Λ_k в следующем виде [21, 22]:

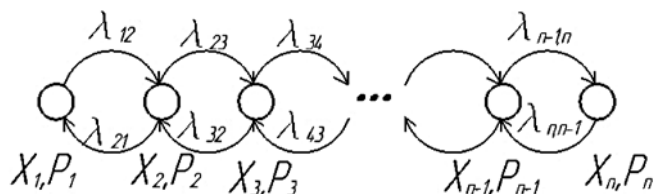


Рис. 1. Граф $\Sigma_{д-н}$ дискретно-непрерывного марковского процесса гибели—размножения с четкими состояниями $X = \{X_i\}_{i=1}^n$

$$\Lambda_k = \begin{pmatrix} \lambda_{12} - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) & \lambda_{32} & 0 \\ \lambda_{23} & -(\lambda_{31} + \lambda_{32}) & \lambda_{31} \\ 0 & & \lambda_{n-1,n} - \lambda_{n,n-1} \end{pmatrix}.$$

Далее в соответствии с (4) по Λ_k записывается $P(1)$ путем использования соответствующих замен, поэтому будем иметь:

$$P(1) = I + \Delta t \Lambda_k,$$

откуда с использованием соотношений (2), (4) получим матрицу нечетких состояний для $P_f(1)$:

$$P_f(1) = \Delta \Gamma^T (I + \Delta t \Lambda_k) \Gamma,$$

где элементы Γ , Δ определены ниже.

Пусть для четких состояний $X_1, X_2, \dots, X_n$ уравнений Колмогорова задано $m < n$ нечетких состояний $X_{f1}, X_{f2}, \dots, X_{fm}$ с функциями принадлежности $r(X_{fi}), i = \overline{1, m}, r \in [0; 1] \subset R$ для простоты треугольного типа, тогда для их $\alpha_p, p = \overline{1, n}$, разрезов будем иметь матрицу $\Gamma_{(n \times m)}$ в следующем виде:

$$\Gamma = \begin{pmatrix} r_{\alpha_n}(X_{f1}) & r_{\alpha_n}(X_{f2}) & \dots & r_{\alpha_n}(X_{fm}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{\alpha_1}(X_{f1}) & r_{\alpha_1}(X_{f2}) & \dots & r_{\alpha_1}(X_{fm}) \end{pmatrix}_{(n \times m)}.$$

Вектор P_0 начальных условий задается в виде

$$P_0 = (p_{10} = n^{-1}, \dots, p_{n0} = n^{-1}),$$

тогда диагональная матрица Δ в уравнении (2) будет иметь вид [16]

$$\Delta = \begin{pmatrix} m(X_{f1}) & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & m(X_{fm}) \end{pmatrix},$$

$$m(X_{f1}) = \left[\sum_{i=1}^n r_{\alpha_i}(X_{f1}) \right]^{-1}, \dots, m(X_{fm}) = \left[\sum_{i=1}^n r_{\alpha_i}(X_{fm}) \right]^{-1}.$$

Затем, как и ранее, используем для $P_f(1)$, с точностью до обозначений, соответствующую замену из (5) и получим:

$$\Lambda_{fk} = \Delta t^{-1}[P_f(1) - I].$$

Далее в соответствии с уравнением (3) запишем уравнение Колмогорова для нечетких состояний:

$$\dot{P}_f(t) = \Lambda_{fk} P_f(t); P_f(0) = P_{f0}; EP_f(t) = 1.$$

Результаты, полученные относительно нечетких состояний для общей модели гибели—размножения, далее реализуются для их простейших типов, рассмотренных в теории надежности и массового обслуживания.

3.1. Простейшая модель надежности

Пусть техническая система, состоящая из двух однотипных контроллеров, банкоматов, станков, систем автоматического регулирования и т.д., имеет узлы состояний $X = \{X_i, p_i\}_{i=0}^2$, p_i — вероятности нахождения в четких состояниях X_i . На каждый из узлов воздействует простейший поток отказов с интенсивностью λ , из-за которого он находится в состоянии "отказа", обозначаемого (–), в функционировании. В промежутке между двумя соседними отказами узел работает безотказно за счет восстановления (ремонта) узла, который восста-

навливается, обозначаемого (+), с интенсивностью μ . Поток восстановления также является простейшим.

Перенумеруем узлы системы в соответствии с табл. 1, в которой "i" узла обозначает число отказов.

Заметим, что номер узла "i" может также обозначать число (+) работающих узлов, тогда табл. 1 будет иметь иной вид.

В соответствии с табл. 1 граф $\Sigma_{д-н}$ (рис. 2) дискретно-непрерывного процесса гибели—размножения будет иметь матрицу λ_s четких состояний и матрицу λ_k уравнений Колмогорова:

$$\Lambda_s = \begin{pmatrix} X_0 & X_1 & X_2 \\ \left(\begin{array}{ccc} 0 & 2\mu & 0 \\ \lambda & 0 & \mu \\ 0 & 2\lambda & 0 \end{array} \right) & \begin{array}{l} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{array} \end{pmatrix};$$

$$\Lambda_k = \begin{pmatrix} \lambda_{00}^k = -2\mu & \lambda_{01}^k = \lambda & \lambda_{02}^k = 0 \\ \lambda_{10}^k = 2\mu & \lambda_{11}^k = -(\lambda + \mu) & \lambda_{12}^k = 2\lambda \\ \lambda_{20}^k = 0 & \lambda_{21}^k = \mu & \lambda_{22}^k = -2\lambda \end{pmatrix}.$$

После замены $P(1) = I + \Delta t \Lambda_k$ элементов матриц λ_k получим переходную матрицу $P(1)$ четкой цепи Маркова:

$$P(1) = I + \Delta t \Lambda_k = \begin{pmatrix} -2\mu\Delta t + 1 & \lambda\Delta t & 0 \\ 2\mu\Delta t & -(\lambda + \mu)\Delta t + 1 & 2\lambda\Delta t \\ 0 & \mu\Delta t & -2\lambda\Delta t + 1 \end{pmatrix}.$$

Далее для четкой цепи выделяются нечеткие состояния X_{f1}, X_{f2} , и для них задаются функции принадлежности дискретного типа, которые в лингвистических терминах представляются термами (рис. 3):

Таблица 1
Состояние системы

Состояния системы	Узел i системы		Примечания
	1	2	
X_0	+	+	Все узлы функционируют (+)
X_1	–	+	Один узел в отказе (–), другой функционирует (+)
X_2	–	–	Оба узла в отказе (–)

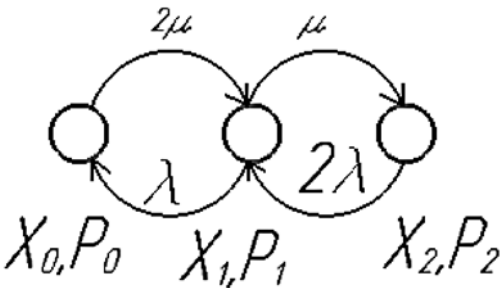


Рис. 2. Граф простейшей модели надежности из двух однотипных элементов с четкими состояниями

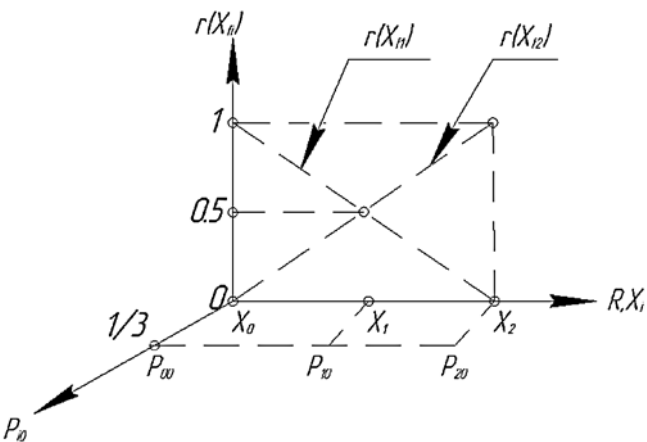


Рис. 3. Нечеткие состояния X_{f1}, X_{f2} модели надежности из двух однотипных элементов

$J_1 = r(X_{f1})$ — "высокая надежность",
 $r \in [0; 1] \subset R$;
 $J_2 = r(X_{f2})$ — "низкая надежность",
 $r \in [0; 1] \subset R$.

Матрица Γ функций принадлежности нечетких состояний будет равна

$$\Gamma^T = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{pmatrix}.$$

Полагая, что для начальных условий четкой цепи справедливо равенство

$$P(t=0) = P_1(t=0) = P_2(t=0) = 1/3,$$

можно записать:

$$m_{f1} = \left[\sum_{i=1}^3 r_{\alpha_i}(X_{f1}) \right]^{-1} = [1 + 1/2 + 0]^{-1} = 2/3;$$

$$m_{f2} = \left[\sum_{i=1}^3 r_{\alpha_i}(X_{f2}) \right]^{-1} = [1 + 1/2 + 0]^{-1} = 2/3.$$

Тогда матрица Δ будет равна

$$\Delta = \begin{pmatrix} m_{f1} & 0 \\ 0 & m_{f2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2/3 & 0 \\ 0 & 2/3 \end{pmatrix} = (2/3)I,$$

где I — единичная матрица.

В результате вычислений Γ , Δ получим переходную матрицу с нечеткими состояниями:

производящей функции для Z -преобразования или преобразованием $P_f(1)$ к диагональному виду матричным методом.

Будем решать уравнение (8) методом Z -преобразования. В результате его применения получим:

$$[P_f(1) - P_{f0}]z^{-1} = P_{fk}(1)P_f(z).$$

После разрешения этого уравнения относительно $P_f(z)$ будем иметь:

$$P_f(z) = G(z)P_{f0}, G(z) = [I - zP_{fk}(1)]^{-1}. \quad (9)$$

Находим $G(z)$ и определитель $|G(z)|$:

$$G(z) = \left[\begin{pmatrix} 1 - zp_{f1f1} & -zp_{f1f2} \\ -zp_{f2f1} & 1 - zp_{f2f2} \end{pmatrix} \right]^{-1};$$

$$|G(z)| = (p_{f1f1}p_{f2f2} - p_{f1f2}p_{f2f1})z^2 - (p_{f1f1} + p_{f2f2})z + 1. \quad (10)$$

Из соотношений (6), (7) имеем:

$$\begin{aligned} \begin{cases} p_{f1f1} + p_{f1f2} = 1 \\ p_{f2f1} + p_{f2f2} = 1 \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} p_{f1f2} = 1 - p_{f1f1} \\ p_{f2f1} = 1 - p_{f2f2} \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow p_{f1f2} \cdot p_{f2f1} = 1 - p_{f1f1} - p_{f2f2} - p_{f1f1} \cdot p_{f2f2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow p_{f1f2} + p_{f2f2} = 1 + p_{f1f1} \cdot p_{f2f2} - p_{f1f2}p_{f2f1} \Rightarrow \\ &\Rightarrow p_{f1f1} + p_{f2f2} = 1 + \alpha, \alpha = p_{f1f1}p_{f2f2} - p_{f1f2} \cdot p_{f2f1}. \end{aligned}$$

$$P_f(1) = \Delta \Gamma^T P \Gamma = (2/3) \begin{pmatrix} 1 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0,5 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -2\mu\Delta t + 1 & \lambda\Delta t & 0 \\ 2\mu\Delta t & -(\lambda + \mu)\Delta t + 1 & 2\lambda\Delta t \\ 0 & \mu\Delta t & -2\lambda\Delta t + 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0,5 & 0,5 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_f(1) = \begin{pmatrix} p_{f1f1} = (0,165\lambda - 0,825\mu)\Delta t + 0,825 & p_{f1f2} = (0,825\lambda - 0,165\mu)\Delta t + 0,165 \\ p_{f2f1} = (-0,165\lambda + 0,825\mu)\Delta t + 0,165 & p_{f2f2} = (-0,825\lambda + 0,165\mu)\Delta t + 0,825 \end{pmatrix}.$$

Здесь, как нетрудно убедиться, имеет место асимптотическое выполнение свойства стохастичности $P_f(1)$:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_{f1f1} + p_{f1f2}) = 1; \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_{f2f1} + p_{f2f2}) = 1. \quad (7)$$

Далее согласно варианту 1 имеем, с точностью до обозначений, матричное уравнение (1) в следующем виде:

$$P_f(n+1) = P_f(1)P_f(n), P_f(0) = P_{f0}, EP_f(n) = 1, \quad (8)$$

которое, как известно, может быть решено различными методами: преобразованием Лапласа

С учетом обозначений для α получим

$$|G(z)| = \alpha z^2 - (1 - \alpha)z + 1 = (1 - z)(1 - \alpha z),$$

поэтому для обратной матрицы (10) будем иметь:

$$G(z) = \begin{pmatrix} a = (1 - zp_{f1f1})|G(z)|^{-1} & b = zp_{f1f2}|G(z)|^{-1} \\ c = zp_{f2f1}|G(z)|^{-1} & d = (1 - zp_{f1f1})|G(z)|^{-1} \end{pmatrix}.$$

Разложение по методу неопределенных коэффициентов элементов a, b, c, d на элементарные дроби дает:

$$\begin{aligned} a &= A_1(1-z)^{-1} + B_1(1-\alpha z)^{-1}, \\ A_1 &= (p_{f_2f_2} - 1)(\alpha - 1)^{-1}, B_1 = (\alpha - p_{f_2f_2})(\alpha - 1)^{-1}; \\ b &= A_2(1-z)^{-1} + B_2(1-\alpha z)^{-1}, \\ A_2 &= -p_{f_1f_2}(\alpha - 1)^{-1}, B_2 = p_{f_1f_2}(\alpha - 1)^{-1}; \\ c &= A_3(1-z)^{-1} + B_3(1-\alpha z)^{-1}, \\ A_3 &= p_{f_2f_1}(\alpha - 1)^{-1}, B_3 = p_{f_2f_1}(\alpha - 1)^{-1}; \\ d &= A_4(1-z)^{-1} + B_4(1-\alpha z)^{-1}, \\ A_4 &= (p_{f_1f_1} - 1)(\alpha - 1)^{-1}, B_4 = (\alpha - p_{f_1f_1})(\alpha - 1)^{-1}. \end{aligned}$$

В результате получим

$$G(z) = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = A(1-z)^{-1} + B(1-\alpha z)^{-1},$$

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} B_1 & B_2 \\ B_3 & B_4 \end{pmatrix}.$$

Применение обратного z преобразования дает:

$$G(n) = (A + B\alpha^n),$$

поэтому получим решение (8) в виде

$$P_f(n) = P_{f0}(A + B\alpha^n) = P_{f0}A + \alpha^n P_{f0}B.$$

Покажем, что параметр $\alpha < 1$ Действительно, за счет выбора величины Δt , можно в соотношении (6) получить:

$$(p_{f_1f_1}, p_{f_2f_2}) \approx 0,825; (p_{f_1f_2}, p_{f_2f_1}) \approx 0,165,$$

поэтому α будет равна

$$\alpha \approx p_{f_1f_1}p_{f_2f_2} - p_{f_1f_2}p_{f_2f_1} \approx (0,825)^2 - (0,165)^2 < 1.$$

Таким образом, для нечетких состояний из (9) будем иметь

$$\begin{aligned} P_f(n+1) &= (A + B\alpha^n)P_{f0} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P_f(n+1) &= AP_{f0} + \alpha^n BP_{f0}, \alpha < 1, \end{aligned}$$

откуда коэффициент готовности $K_{Гf}$ для нечетких состояний будет равен

$$K_{Гf} = \lim_{n \rightarrow \infty} P_f(n+1) = AP_{f0}.$$

Теперь, если $P_{f0} = (1, 0)^T$, то

$$K_{Гf} = AP_{f0} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = (A_1, A_3)^T,$$

откуда

$K_{Гf_1f_1} = A_1 = (p_{f_1f_1} - 1)(\alpha - 1)^{-1}$ — коэффициент "высокой готовности — J_1 ";

$K_{Гf_2f_2} = A_3 = (p_{f_1f_2} - 1)(1 - \alpha)^{-1}$ — коэффициент "низкой готовности — J_2 ".

Для $P_{f0} = (1, 0)^T$ соответственно получим

$$K_{Гf_1f_1} = AP_{f0} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = (A_2, A_4)^T,$$

$K_{Гf_1f_2} = A_2 = (p_{f_1f_1} - 1)(\alpha - 1)^{-1}$ — коэффициент "высокой готовности — J_1 ";

$K_{Гf_2f_2} = A_4 = (p_{f_1f_2} - 1)(1 - \alpha)^{-1}$ — коэффициент "низкой готовности — J_2 ".

Сравнение компонент вектора $K_{Гf}$ нечетких состояний для различных компонент вектора P_{f0} нечетких начальных состояний показывает, что их значения не зависят от P_f , что косвенно указывает на корректность приведенных выше преобразований.

Матрица M_f среднего числа шагов до первого достижения X_{f_2} из состояния X_{f_1} находится из матричного уравнения

$$M_f = (I - U + EU_0)A_0,$$

где $U = [I + P_f(n) + \Phi]^{-1}$ — фундаментальная матрица; U_0 — диагональная матрица, полученная из U путем замены ее диагональных элементов нулями; A_0 — диагональная матрица с диагональными элементами, равными финальным вероятностям $\lim_{n \rightarrow \infty} P_f(n)$ нечетких состояний; матрица I и вектор E были определены ранее.

По варианту 2. Используя $P_f(1)$ в соотношении (6) путем замены

$$\Lambda_f = \Delta t^{-1}[P_f(1) - I],$$

получим матрицу Λ_{fs} и далее по ней матрицу Λ_{fk} матричного уравнения Колмогорова:

$$\begin{aligned} P_f(1) &= \begin{pmatrix} p_{f_1f_1} & p_{f_1f_2} \\ p_{f_2f_1} & p_{f_2f_2} \end{pmatrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_{fs} &= \begin{pmatrix} p_{f_1f_1} - 1 & p_{f_1f_2} \\ p_{f_2f_1} & p_{f_2f_2} - 1 \end{pmatrix} \Delta t^{-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_{fk} &= \begin{pmatrix} -(p_{f_1f_1} + p_{f_1f_2} - 1) & p_{f_2f_1} \\ p_{f_1f_2} & -(p_{f_2f_2} + p_{f_2f_1} - 1) \end{pmatrix} \Delta t^{-1}. \end{aligned}$$

В результате получим задачу Коши для матричного уравнения Колмогорова при наличии ограничения:

$$\dot{P}_f(t) = \Lambda_{fk} P_f(t), P_f(0) = P_{f0}, EP_f(t) = 1. \tag{11}$$

В работе [1] показано, что эта задача имеет решение в виде матричной экспоненты:

$$P_f^*(t) = \exp(\Lambda_{fk} \cdot t) P_{f0}, t \in [0, T], T > 0 \subset R,$$

которое удовлетворяет условию нормировки $EP_f^*(t) \equiv 1$.

Расчеты по соотношениям (6) показывают, что существует $\lim_{t \rightarrow \infty} P_f^*(t) = P_f(\infty)$ и, как следствие, вектор $P_f(\infty)$ удовлетворяет матричной системе

$$\begin{cases} \Lambda_{fk} P_f(\infty) = 0; \\ EP_f(\infty) = 1. \end{cases}$$

Вектор ее решения определяет коэффициент готовности "высокая/низкая — J_1/J_2 ".

Числовая характеристика ET_{f_1} — математическое ожидание случайной переменной T_{f_1} нахождения системы в нечетких состояниях X_{f_1} до первого попадания в процессе блужданий по графу в нечеткое состояние X_{f_2} определяется а основе утверждения о том, что для простейшего потока и восстановления функция $f(T_{f_1})$ случайной переменной T_{f_1} подчиняется показательному закону $f(T_{f_1}) = \lambda_{f_1} \exp(-\lambda_{f_1} t), t \in [0, T], T > 0$, поэтому $ET_{f_1} = \int_{-\infty}^{\infty} t f(T_{f_1}) dt = \lambda_{f_1}^{-1}$.

3.2. Простейшие модели массового обслуживания

Будем рассматривать модели с нечеткими состояниями при обслуживании потока заявок без ожидания (без очереди — **А**) и с ожиданием (с очередью — **Б**), а также с приоритетным обслуживанием (**С**) полагая при этом, что исходная система имеет конечное число четких состояний.

А. Обслуживание без очереди с нечеткими состояниями. Пусть для простоты рассмотрения имеем техническую систему, которая состоит из двух однотипных элементов и находится в четких состояниях $X = \{X_i, p_i\}_{i=0}^2$, где, как и ранее (п. 3.1), p_i — вероятности нахождения в четких состояниях X_i . На каждый из узлов системы воздействует простейший поток заявок на обслуживание с интенсивно-

стью λ , из-за которого узел системы находится в состоянии "занято", обозначаемого далее (–), в функционировании. В промежутке между двумя соседними состояниями "занято" узел находится в состоянии "свободен", обозначаемом (+). В этом состоянии узел имеет производительность (интенсивность) μ , и поток через него также считаем простейшим, аналогично потоку λ .

Нумеруем состояния X_i в соответствии с табл. 2.

В соответствии с табл. 2 граф $\Sigma_{д-н}$ представлен на рис. 4, а матрицы Λ_s и Λ_k состояний и уравнений Колмогорова имеют вид

$$\Lambda_s = \begin{matrix} & \begin{matrix} X_0 & X_1 & X_2 \end{matrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & \lambda & 0 \\ \mu & 0 & \lambda \\ 0 & 2\mu & 0 \end{pmatrix} & \begin{matrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{matrix} \end{matrix};$$

$$\Lambda_k = \begin{pmatrix} -\lambda & \mu & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \mu) & 2\mu \\ 0 & \lambda & -2\mu \end{pmatrix}.$$

После замены $\Lambda_k = \Delta t^{-1}[P(1) - I]$ получим переходную матрицу $P(1)$ четкой цепи Маркова:

$$P(1) = I + \Delta t \Lambda_k = \begin{pmatrix} -\lambda \Delta t + 1 & \mu \Delta t & 0 \\ \lambda \Delta t & -(\lambda + \mu) \Delta t + 1 & 2\mu \Delta t \\ 0 & \lambda \Delta t & -2\mu \Delta t + 1 \end{pmatrix}.$$

Таблица 2

Состояние системы

Состояния системы	Число элементов системы		Примечания
X_0	+	+	Оба узла свободны — (+, +)
X_1	–	+	Один узел занят, другой свободен, неважно какой — (–, +), или (+, –)
	+	–	
X_2	–	–	Оба узла заняты — (–, –)

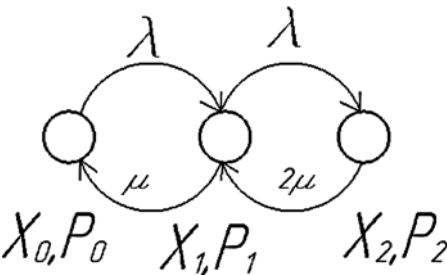


Рис. 4. Граф модели обслуживания без очереди системы из двух однотипных элементов с четкими состояниями

Далее выделяется нечеткое состояние X_{f_1}, X_{f_2} с функциями принадлежности треугольного типа, подобные тем, которые изображены на рис. 3, и представляемые термами:

$J_1 = r(X_{f_1})$ — "низкий" уровень занятости системы, $r \in [0; 1] \subset R$;

$J_2 = r(X_{f_2})$ — "высокий" уровень занятости системы, $r \in [0; 1] \subset R$.

Переходная матрицы $P_f(1)$ с нечеткими состояниями будет равна

$$P_f(1) = \Delta \Gamma^T \begin{pmatrix} -\lambda \Delta t + 1 & \mu \Delta t & 0 \\ \lambda \Delta t & -(\lambda + \mu) \Delta t + 1 & 2\mu \Delta t \\ 0 & \lambda \Delta t & -2\mu \Delta t + 1 \end{pmatrix} \Gamma = \begin{pmatrix} p_{f_1 f_1} & p_{f_1 f_2} \\ p_{f_2 f_1} & p_{f_2 f_2} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$p_{f_1 f_1} = (-0,33\lambda + 0,825\mu)\Delta t + 0,825;$$

$$p_{f_1 f_2} = (-0,165\lambda + 1,155\mu)\Delta t + 0,165;$$

$$p_{f_2 f_1} = (0,495\lambda + 0,165\mu)\Delta t + 0,165;$$

$$p_{f_2 f_2} = -0,825\mu\Delta t + 0,825.$$

Очевидно:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_{f_1 f_1} + p_{f_1 f_2}) = 1; \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (p_{f_2 f_1} + p_{f_2 f_2}) = 1.$$

Согласно варианту 1 имеем матричное разностное уравнение (8) с переходной матрицей (12). Решаем его матричным методом. Для этого представляем разностное уравнение в другой форме:

$$P_f(n+1) = P_f(1)P_f(n) \Leftrightarrow P_f(n) = P_f^n(1)P_{f0}$$

и далее используем свойство подобных матриц $P_f(1)$ и U , для которых из определения подобия следует, что $P_f(1) = TUT^{-1}$, T — матрица из собственных векторов $P_f(1)$; U — диагональная матрица из собственных чисел $P_f(1)$.

Для подобных матриц $P(1)$, U справедливо соотношение

$$P_f^n(1) = TU^nT^{-1},$$

$$T = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} = (T_1, T_2), \quad T_1, T_2 — \text{собственные}$$

векторы $P_f(1)$ удовлетворяющие условию: $P_f(1)T_1 = \lambda_{f_1}T_1$, $P_f(1)T_2 = \lambda_{f_2}T_2$, $\lambda_{f_1}, \lambda_{f_2}$ — собственные числа $P_f(1)$.

Числа $\lambda_{f_1}, \lambda_{f_2}$ находятся из уравнения

$$\begin{aligned} |P_f(1) - \lambda_f I| &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \begin{vmatrix} p_{f_1 f_1} - \lambda_f & p_{f_1 f_2} \\ p_{f_2 f_1} & p_{f_2 f_2} - \lambda_f \end{vmatrix} &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \lambda_f^2 - \beta \lambda_f + \alpha &= 0, \beta = p_{f_1 f_1} + p_{f_2 f_2}; \\ \alpha = p_{f_1 f_1} p_{f_2 f_2} - p_{f_1 f_2} p_{f_2 f_1}, &\lambda_{f_1} = \alpha < 1, \lambda_{f_2} = 1. \end{aligned}$$

Таким образом, $\lambda_{f_1}, \lambda_{f_2}$ являются действительными и различными числами.

Находим собственные векторы T_1, T_2 :

$$\begin{aligned} P_f(1) \cdot T_1 &= \lambda_{f_1} T_1 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \begin{pmatrix} p_{f_1 f_1} & p_{f_1 f_2} \\ p_{f_2 f_1} & p_{f_2 f_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{12} \end{pmatrix} &= \alpha \begin{pmatrix} t_{11} \\ t_{12} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \quad (13) \\ \Leftrightarrow \begin{cases} (p_{f_1 f_1} - \alpha)t_{11} + p_{f_1 f_2}t_{12} = 0; \\ p_{f_2 f_1}t_{11} + (p_{f_2 f_2} - \alpha)t_{21} = 0. \end{cases} \end{aligned}$$

Нетрудно показать, что уравнения (13), (12) линейно зависимы, поэтому достаточно выбрать одно из них. Для определенности выберем (13), тогда:

$$\begin{aligned} (p_{f_1 f_1} - \alpha)t_{11} + p_{f_1 f_2}t_{21} &= 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow p_{f_2 f_1}t_{11} + p_{f_1 f_2}t_{21} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow t_{11} &= (-p_{f_1 f_2}/p_{f_2 f_1})t_{21}. \end{aligned}$$

Положим $t_{21} = p_{f_2 f_1}$, тогда $t_{11} = -p_{f_1 f_2}$, поэтому вектор $T_1^T = (t_{11}, t_{21}) = (-p_{f_1 f_2}, p_{f_2 f_1})$.

Аналогично находится вектор $T_2^T = (t_{12}, t_{21})$:

$$\begin{aligned} P_f(1)T_2 &= \lambda_{f_2}T_2 \Rightarrow P_f(1)T_2 = 1 \cdot T_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow T^T &= (t_{12} = 1, t_{22} = 1). \end{aligned}$$

В результате матрицы T и T^{-1} будут равны

$$\begin{aligned} T &= \begin{pmatrix} -p_{f_1 f_2} & 1 \\ p_{f_2 f_1} & 1 \end{pmatrix}; T^{-1} = |T|^{-1} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ p_{f_2 f_1} & p_{f_1 f_2} \end{pmatrix}, \\ |T| &= p_{f_1 f_2} + p_{f_2 f_1}. \end{aligned}$$

Таким образом, получим

$$\begin{aligned} P_f(1) &= TUT^{-1} \Rightarrow P_f^n(1) = TU^nT^{-1} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_f^n(1) &= |T|^{-1} \begin{pmatrix} -p_{f_1 f_2} & 1 \\ p_{f_2 f_1} & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \alpha^n & 0 \\ 0 & 1^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ p_{f_2 f_1} & p_{f_1 f_2} \end{pmatrix} &\Rightarrow \\ \Rightarrow P_f^n(1) &= \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}, \quad (14) \end{aligned}$$

Состояние системы

Состояния системы	Состояние элемента обслуживания A	Состояние очереди $M = 1$	Примечания
X_0	+	+	Узел A свободен — (+), место M свободно — (+)
X_1	—	+	Узел A занят — (—), место M свободно — (+)
X_2	—	—	Узел A занят — (—), место M занято — (—)

$$P_{11} = (p_{f_1 f_1} \alpha^n + p_{f_2 f_1}) |T|^{-1};$$

$$P_{12} = (-p_{f_1 f_2} \alpha^n + p_{f_1 f_1}) |T|^{-1};$$

$$P_{21} = (-p_{f_2 f_1} + \alpha^n) |T|^{-1};$$

$$P_{22} = (p_{f_2 f_1} \alpha^n + p_{f_2 f_2}) |T|^{-1}.$$

В результате получим решение $P_f(n)$ в виде

$$P_f(n) = P_f^n(1) P_{f0} \Rightarrow \\ \Rightarrow P_f(n) = \begin{pmatrix} (p_{f_1 f_2} \alpha^n + p_{f_2 f_1}) (p_{f_1 f_2} + p_{f_2 f_1})^{-1} \\ (-p_{f_1 f_2} \alpha^n + p_{f_1 f_1}) (p_{f_1 f_2} + p_{f_2 f_1})^{-1} \end{pmatrix} P_{f0},$$

$P_{f0} = (p_{f_1 0}, p_{f_2 0})$ — вектор начальных условий, откуда следует, что коэффициент $K_f(\infty)$ занятости системы с нечеткими состояниями не зависит от P_{f0} и будет равен:

$$K_f(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} P_f(n) = \begin{pmatrix} (p_{f_2 f_2} - 1)(\alpha - 1)^{-1} \\ -p_{f_1 f_2}(\alpha - 1)^{-1} \end{pmatrix},$$

$p_{f_i f_j}$ — определены в (12).

По варианту 2. Используя в матрице $P_f(1)$, найденной ранее, замену $\Lambda_f = \Delta t^{-1} [P_f(1) - 1]$, получим матрицу Λ_{fs} и далее по ней матрицу Λ_{fk} матричного уравнения Колмогорова. В результате, так же как в п. 3.1, вариант 2, будем иметь задачу Коши типа (11) для уравнения Колмогорова при наличии ограничений, с матрицей $P_f(1)$, определяемой по (14). Затем решается матричная система нахождения $K_f(\infty)$.

В. Обслуживание с очередью и нечеткими состояниями. Пусть имеем для простоты число $M = 1$ мест в очереди и один элемент для обслуживания потока заявок на обслуживание. Четкие состояния в этом случае нумеруются в соответствии с табл. 3. По таблице граф $\Sigma_{д-н}$ представлен на рис. 5, матрицы Λ_s , Λ_k будут иметь вид

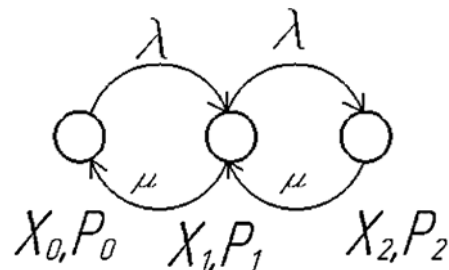


Рис. 5. Граф модели обслуживания с очередью в одно место для системы с одним элементом обслуживания

а нечеткие состояния X_{f_1}, X_{f_2} представляются термами J_1, J_2 , связанными с занятостью системы. Далее по аналогии с вышесказанным могут быть реализованы варианты 1 и 2, и находятся стационарные режимы работы систем с нечеткими состояниями.

Замечание. Выше была рассмотрена система с конечным числом четких и нечетких состояний. Однако в прикладных задачах имеются системы с бесконечным числом состояний, например, число мест в очереди $M \rightarrow \infty$. В этом случае число состояний в системе также становится бесконечным и в этом случае возникает проблема с представлением символа " ∞ " в нечетких терминах. Она относительно легко решается путем отбрасывания части уравнений, полагая, что они являются малыми в системе. Тогда размерность соответствующих матриц является конечной, и поэтому к уравнениям может быть применена выше приведенная методика понижения размерности путем введения нечетких состояний.

С. Приоритетное обслуживание с нечеткими состояниями [23]. Полагаем, что имеем простейшую систему, когда на ее одноканальный вход поступают два независимых простейших потока с параметрами λ_1, λ_2 . Для простоты полагается отсутствие в системе ожидания. Первому потоку присвоен старший абсолютный приоритет. Это

$$\Lambda_s = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & 0 \\ \mu & 0 & \lambda \\ 0 & 2\mu & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{matrix}; \Lambda_k = \begin{pmatrix} -\lambda & \mu & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \mu) & \mu \\ 0 & \lambda & -\mu \end{pmatrix},$$

где λ, μ — интенсивности обслуживания и нахождения в очереди для их простейших потоков.

Переходная матрица $P(1)$ будет иметь вид

$$P(1) = \begin{pmatrix} -\lambda \Delta t + 1 & \mu \Delta t & 0 \\ \lambda \Delta t & -(\lambda + \mu) \Delta t + 1 & \mu \Delta t \\ 0 & \lambda \Delta t & -\mu \Delta t + 1 \end{pmatrix},$$

означает, что из-за отсутствия ожидания в обслуживании заявки второго типа теряются из-за прерывания в обслуживании потока первого типа. Кроме того, они теряются, если в момент прихода потока второго типа система занята обслуживанием потока первого типа.

Относительно длительности обслуживания потоков обоих типов предполагается, что они являются независимыми случайными величинами, распределенными по экспоненциальному закону с соответствующими параметрами λ_1 и λ_2 соответственно. Четкие состояния системы нумеруются в соответствии с табл. 4.

Таблица 4

Состояния системы $X_i, i = \overline{0, 2}$

X_0	Система в момент t свободна
X_1	Система в момент t обслуживает поток 1-го типа
X_2	Система в момент t обслуживает поток 2-го типа

По табл. 4 граф $\Sigma_{\text{д-н}}$ представлен на рис. 6, матрицы Λ_s, Λ_k имеют вид

$$\Lambda_s = \begin{pmatrix} 0 & \lambda_1 & \lambda_2 \\ \mu_1 & 0 & \lambda \\ \mu_2 & \lambda_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{matrix};$$

$$\Lambda_k = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2) & \mu_1 & \mu_2 \\ \lambda_1 & -\mu_1 & \lambda_1 \\ \lambda_2 & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2) \end{pmatrix}.$$

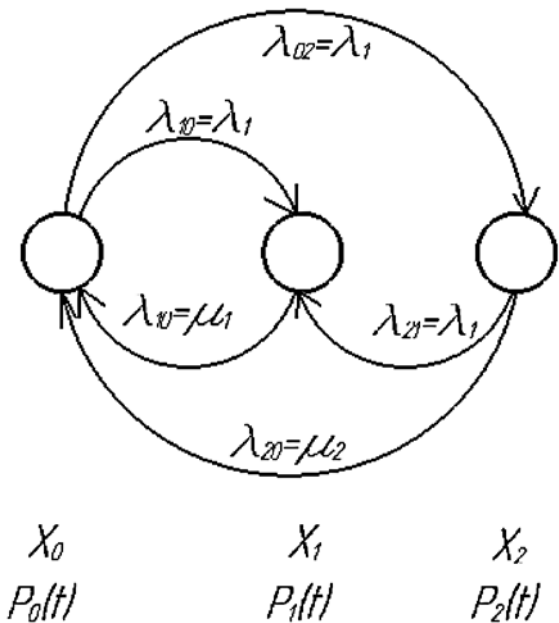


Рис. 6. Граф $\Sigma_{\text{д-н}}$ модели обслуживания с приоритетами

Переходная матрица $P(1)$ будет иметь вид

$$P(1) = \begin{pmatrix} -(\lambda_1 + \lambda_2)\Delta t + 1 & \mu_1\Delta t & \mu_2\Delta t \\ \lambda_1\Delta t & -\mu_1\Delta t + 1 & \lambda_1\Delta t \\ \lambda_2\Delta t & 0 & -(\lambda_1 + \mu_2)\Delta t + 1 \end{pmatrix}$$

и далее по аналогии с предыдущим могут быть реализованы варианты 1 и 2, а затем по аналогии с предыдущими схемами **A — C** находится стационарный режим функционирования системы с нечеткими состояниями.

4. Выводы

То обстоятельство, что различные характеристики систем обслуживания и надежности получают стандартным образом, связано с тем, что нечеткие состояния, формируемые функциями принадлежности, являются по своей сути четкими и поэтому к ним применена вся известная теория четких марковских процессов. Разбиение совокупности четких состояний на нечеткие в некотором смысле подобно представлению четких состояний в виде подмножеств состояний при определении закона распределения случайной величины времени однократного пребывания марковского процесса в произвольном подмножестве четких состояний. Заметим, что задача преобразования четких состояний в укрупненные является типичной и во многих случаях диктуется постановкой задачи.

Заключение

Сформулирована задача преобразования дискретно-непрерывного случайного процесса Маркова с четкими состояниями в процесс с нечеткими состояниями, что позволяет уменьшить размерность исходной задачи.

Метод решения путем такого преобразования состоит в приближенном равенстве четкого дискретно-непрерывного марковского процесса и четкой цепи Маркова, для которой используется известная из теории нечетких множеств трансформация четкой цепи в цепь с нечеткими состояниями.

Сформулированная задача о нечетких состояниях и метод ее решения реализован в модели гибели—размножения применительно к простейшей модели надежности системы, состоящей из двух однотипных ее элементов.

Для простейшей модели массового обслуживания реализована ее модель с нечеткими

состояниями без ожидания (без очереди) и с ожиданием (с очередью) с конечным числом состояний.

Отмечено, что в случае с бесконечным числом состояний задача их укрупнения в общем случае неразрешима из-за проблемы представления символа " ∞ " в нечетких терминах. Однако, если исходная система может быть усечена за счет отбрасывания малой его части и превращения ее в систему с конечным числом состояний, тогда к последней усеченной системе применима предложенная методика о нечетких состояниях.

Список литературы

1. Волков И. К., Зуева С. М., Цветкова Г. М. Случайные процессы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2006. 447 с.
2. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М.: Сов. Радио, 1977. 488 с.
3. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy linear systems // Fuzzy sets and systems. 1998. N. 96. P. 201–209.
4. Ezzati R. Solving fuzzy linear systems // Soft computing. 2011. Vol. 5(1). P. 193–197.
5. Ezzati R., Khezerloo S., Yousefzadeh A. Solving fully fuzzy linear system of equations in general form // Journal of Fuzzy Set Valued Analysis. 2012. P. 1–11. DOI: 10.5899/2012/jfsva-00117.
6. Мочалов И. А., Хрисат М. С. Оценивание параметров модели по нечетким случайным данным // Информационные технологии. 2014. Т. 20, № 4. С. 251–257.
7. Мочалов И. А., Хрисат М. С., Шихаб Еддин М. Я. Нечеткие дифференциальные уравнения в задачах управления. Часть 1 // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 3. С. 171–178.
8. Мочалов И. А., Хрисат М. С., Шихаб Еддин М. Я. Нечеткие дифференциальные уравнения в задачах управления. Часть 11 // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 4. С. 243–250.
9. Деменков Н. П., Мочалов И. А. Динамика нечеткой системы автоматической оптимизации // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, сер. Приборостроение. 2016. № 1(106). С. 59–73.
10. Казакевич В. В. Автоколебания (компаж) в компрессорах. М: Машиностроение, 1974. 192 с.
11. Деменков Н. П., Матвеев В. А., Мочалов И. А. Нечеткие методы моделирования волновых твердотельных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана, сер. Приборостроение. 2018. № 3. С. 33–47.
12. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Ч. 1 // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 4. С. 251–258.
13. Деменков Н. П., Микрин Е. А., Мочалов И. А. Нечеткое преобразование Лапласа в задачах нечеткого математического моделирования. Ч. 2 // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 5. С. 362–369.
14. Jiuping Xu, Zhigao Liao, Juan J. Nieto. A class of linear differential dynamical systems with fuzzy matrices // J. Math analysis and application. 2010. Vol. 368. P. 52–68. DOI: 10.1016/j.jmaa.2009.12.053.
15. Jiuping Xu, Zhigao Liao, Zhineng Hu. A class of linear differential dynamical systems with fuzzy initial condition // Fuzzy sets & systems. 2007. Vol. 158. P. 2339–2358. DOI: 10.1016/j.fss.2007.04.016.
16. Pearson D. W. Aproperty of linear fuzzy differential equations // Appl.math.lett. 1997. Vol.10, N. 3. P. 99–103.
17. Ghazanfari B., Niazi S., Ghazanfari A. G. Linear matrix differential dynamical systems with fuzzy matrices // Appl. math. model. 2012. Vol. 36. P. 348–356. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.054.
18. Sadeghi A., Izani Md., Ismail A., Jameel A. F. Solving systems of fuzzy differential equation // International Mathematical Forum. 2011. Vol. 6, N. 42. P. 2087–2100.
19. Мочалов И. А. и др. Нечеткие вероятностно-статистические методы // Информационные технологии. Приложение. 2003. № 4. С. 1–24.
20. Bhattacharyya Malay. Fuzzy markovian decision process // Fuzzy sets and systems. 1998. N. 99(3). P. 273–282. DOI: 10.1016/S0165-0114(96)00400-9.
21. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа. 2000. 383 с.
22. Лабскер А. Г. Вероятностное моделирование в финансово-экономической области. М.: Альпина паблишер. 2002. 224 с.
23. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2012. 304 с.

N. P. Demenkov, Ph.D. Tech. Sciences, Associate Professor, e-mail: dnp@bmstu.ru,

E. A. Mikrin, Dr. Tech. Sciences, Professor,

I. A. Mochalov, Dr. Tech. Sciences, Professor, e-mail: intelsyst@mail.ru,
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Markov and Semi-Markov Processes with Fuzzy States. Part 1. Markov Processes

For a discrete-continuous random Markov process, the problem of reducing the dimension of the matrix Cauchy problem for the Kolmogorov matrix equation is formulated and solved by introducing fuzzy states using the proximity of this equation to the matrix difference equation. The simplest reliability and mass service problems have been solved, with the help of which the proposed methodology for applying the technique of introducing fuzzy states, which allows us to reduce the dimension of the original problem, is demonstrated.

Keywords: fuzzy states of the Markov process; reliability and queuing models with fuzzy states

DOI: 10.17587/it.26.323-334

References

1. Volkov I. K., Zueva S. M., Tsvetkova G. M. Random processes, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 2006, 447 p. (in Russian).
2. Tihonov V. I., Mironov M. A. Markov processes, Moscow, Sov. Radio, 1977, 488 p. (in Russian).
3. Friedman M., Ming M., Kandel A. Fuzzy linear systems, *Fuzzy sets and systems*, 1998, no. 96, pp. 201–209.
4. Ezzati R. Solving fuzzy linear systems, *Soft computing*, 2011, vol. 5(1), pp. 193–197.
5. Ezzati R., Khezerloo S., Yousefzadeh A. Solving fully fuzzy linear system of equations in general form, *Journal of Fuzzy Set Valued Analysis*, 2012, pp. 1–11. DOI: 10.5899/2012/jfsva-00117.
6. Mochalov I. A., Hrisat M. S. *Informatsionnye Tehnologii*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 251–257 (in Russian).
7. Mochalov I. A., Hrisat M. S., Shihab Eddin M. Ya. *Informatsionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 171–178 (in Russian).
8. Mochalov I. A., Hrisat M. S., Shihab Eddin M. Ya. *Informatsionnye Tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 4, pp. 243–250 (in Russian).
9. Demenkov N. P., Mochalov I. A. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman, ser. Priborostroenie*, 2016, no. 1(106), pp. 59–73 (in Russian).
10. Kazakevich V. V. Self-oscillations (composition) in compressors, Moscow, Mashinostroenie, 1974, 192 p. (in Russian).
11. Demenkov N. P., Matveev V. A., Mochalov I. A. *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman, ser. Priborostroenie*, 2018, no. 3, pp. 33–47 (in Russian).
12. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A. *Informatsionnye Tehnologii*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 251–258 (in Russian).
13. Demenkov N. P., Mikrin E. A., Mochalov I. A. *Informatsionnye Tehnologii*, 2017, vol. 23, no. 5, pp. 362–369 (in Russian).
14. Jiuping Xu, Zhigao Liao, Juan J. Nieto. A class of linear differential dynamical systems with fuzzy matrices, *J. Math analysis and application*, 2010, vol. 368, pp. 52–68. DOI: 10.1016/j.jmaa.2009.12.053.
15. Jiuping Xu, Zhigao Liao, Zheneng Hu. A class of linear differential dynamical systems with fuzzy initial condition, *Fuzzy sets & systems*, 2007, vol. 158, pp. 2339–2358. DOI: 10.1016/j.fss.2007.04.016.
16. Pearson D. W. A property of linear fuzzy differential equations, *Appl. math. lett.*, 1997, vol. 10, no. 3, pp. 99–103.
17. Ghazanfari B., Niazi S., Ghazanfari A. G. Linear matrix differential dynamical systems with fuzzy matrices, *Appl. math. model*, 2012, vol. 36, pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.apm.2011.05.054.
18. Sadeghi A., Izani Md., Ismail A., Jameel A. F. Solving systems of fuzzy differential equation, *International Mathematical Forum*, 2011, vol. 6, no. 42, pp. 2087–2100.
19. Mochalov I. A. et al. *Informatsionnye Tehnologii. Prilozhenie*, 2003, no. 4, pp. 1–24 (in Russian).
20. Bhattacharyya Malay. Fuzzy markovian decision process. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, no. 99(3), pp. 273–282. DOI: 10.1016/S0165-0114(96)00400-9.
21. Venttsel E. S., Ovcharov L. A. The theory of random processes and its engineering applications, Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 383 p. (in Russian).
22. Labsker A. G. Probabilistic modeling in the financial and economic field, Moscow, Alpina publisher, 2002, 224 p. (in Russian).
23. Ivchenko G. I., Kashtanov V. A., Kovalenko I. N. Queuing theory, Moscow, Kniznyy dom "LIBROKOM", 2012, 304 p. (in Russian).

УДК 004.021

DOI: 10.17587/it.26.334-341

А. А. Дубанов, канд. техн. наук, доц., alandubanov@mail.ru,
Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ

Модель группового преследования одиночной цели на основе следования ранее прогнозируемым траекториям

Приводится описание геометрической модели, когда группа из преследователей преследует одиночную цель. Движение происходит на плоскости, но при необходимости данную модель можно перенести на явно заданную поверхность. Скорость движения всех участников, как преследователей, так и цели, постоянна по модулю. Цели и стратегии каждого из преследователей, несмотря на различие траекторий, объединяет один критерий. Они стремятся подойти к точке пространства, связанной с преследуемым объектом, под заданным направлением, соблюдая ограничения по кривизне траектории. Цель и стратегия объекта преследования определяется поведением одного из преследователей.

Ключевые слова: преследование, уклонение, убежание, моделирование, алгоритм, цель, преследователь, траектория

Введение

Квазидискретные модели в задаче преследования — это возможность приближенного вычисления динамических процессов с дальнейшей визуализацией. В нашей задаче вводится период дискретизации по времени, в течение которого преследователь совершает шаг и сме-

ну направления движения. В данной статье рассматриваются вопросы следования преследователем заранее смоделированной траектории. Предполагается, что траектория, отвечающая заданным требованиям, будет моделироваться в автоматическом режиме в каждый момент времени. В качестве примера мы рассмотрели группу из четырех преследователей.

1. Моделирование траекторий

Рассмотрим задачу моделирования траектории преследователя. Траектория преследователя должна начинаться в точке P , скорость преследователя в этой точке равна V_P , настигнуть цель преследователь должен в точке T .

Предполагаемая траектория движения состоит из двух частей — из прямолинейного отрезка, соединяющего точки P и P_{tan} , и из дуги $\overline{T, P_{tan}}$ радиуса R_P (рис. 1).

Ограничение моделируемой траектории заключается в том, что радиус кривизны не может быть меньше величины R_P . Угол входа преследователя в точку T определяется вектором скорости V'_P . Направление данного вектора в тестовой программе было выбрано таким, чтобы вектор скорости преследователя V'_P был перпендикулярен вектору скорости цели V_T . Центр окружности, которая отвечает заданным условиям, вычисляется по формуле $C_T = T + R_P \begin{pmatrix} -V_T \\ |V_T| \end{pmatrix}$.

Для нахождения точки P_{tan} , которая также является точкой сопряжения прямой (P, P_{tan}) и дуги $\overline{T, P_{tan}}$ реализована следующая процедура. Задается локальная система координат с центром в точке P и с базисными векторами e_1 и e_2 : $e_1 = \frac{C_T - P}{|C_T - P|}$; $e_2 = \begin{bmatrix} -e_{1y} \\ e_{1x} \end{bmatrix}$. Базис (e_1, e_2) является ортогональным.

В такой системе координат точка C_T преобразуется к виду: $C_{T,n} = \begin{bmatrix} (C_T - P)e_1 \\ (C_T - P)e_2 \end{bmatrix}$. Очевидно, что координаты $C_{T,n}$ точки C_T в этой системе координат будут равны $C_{T,n} = \begin{bmatrix} |C_T - P| \\ 0 \end{bmatrix}$.

Пусть модуль вектора $|C_T - P| = C_x$ (рис. 2), тогда в локальной системе координат (e_1, e_2) с центром в точке P координаты точки сопряжения $P_{tan,n}$ будут удовлетворять системе уравнений

$$\begin{aligned} (P_{tan,n} - C_{T,n})(P_{tan,n} - C_{T,n}) &= R_P^2; \\ (P_{tan,n} - C_{T,n})P_{tan,n} &= 0. \end{aligned}$$

Данная система уравнений в локальной системе координат (e_1, e_2) с центром в точке P имеет решение

$$P_{tan,n} = \begin{bmatrix} \frac{C_x^2 - R_P^2}{C_x} \\ \pm \frac{R_P \sqrt{(C_x + R_P)(C_x - R_P)}}{C_x} \end{bmatrix}.$$

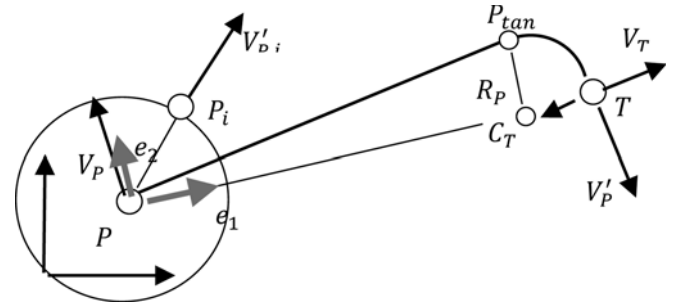


Рис. 1. Предполагаемая траектория следования преследователя

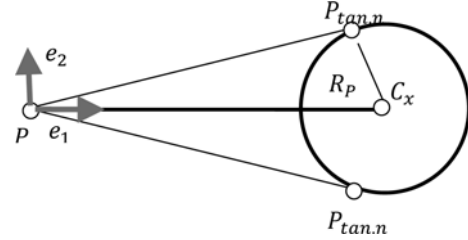


Рис. 2. Определение точки сопряжения в локальной системе координат

Для перевода точки $P_{tan,n}$ в мировую систему координат (H_1, H_2) , где $H_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $H_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, необходимо получить выражения для базиса (H_1, H_2) в базисе (e_1, e_2) : $h_1 = \begin{bmatrix} H_1 e_1 \\ H_1 e_2 \end{bmatrix}$; $h_2 = \begin{bmatrix} H_2 e_1 \\ H_2 e_2 \end{bmatrix}$.

Тогда координаты P_{tan} точки $P_{tan,n}$ в мировой системе координат будут следующими: $P_{tan} = \begin{bmatrix} P_{tan,n} h_1 \\ P_{tan,n} h_2 \end{bmatrix} + P$. В тестовой программе, написанной по материалам главы, мы выбрали вариант, соответствующий верхнему положению точки $P_{tan,n}$ (рис. 2).

Поскольку мы рассматриваем квазидискретную модель задачи преследования, то вводим период дискретизации ΔT . Тогда в рамках настоящей модели, имеем, что шаг преследователя за период дискретизации равен $|V_P| \Delta T$.

Если минимальный радиус кривизны траектории преследователя равен R_P , то будет обоснованным считать, что угловая частота вращения преследователя P на выражах будет равна $\omega_P = \frac{|V_P|}{R_P}$. Угол поворота при выполнении шага итерации не может превышать величины $\omega_P \Delta T$.

2. Анализ координат точки касания P_{tan} прямой (P, P_{tan}) с окружностью (C_T, R_P) в системе координат преследователя

В нашей квазидискретной модели задачи преследования преследователь имеет целью

догнать преследуемый объект, чтобы в момент совпадения координат преследователь имел заданный вектор скорости, при этом минимальный радиус кривизны траектории не был меньше допустимого. Сформируем базис (v_1, v_2) с началом координат в точке P (рис. 3): $v_1 = \frac{V_P}{|V_P|}$; $v_2 = \begin{bmatrix} -v_{1y} \\ v_{1x} \end{bmatrix}$. В данную динамическую систему координат, зависящую от скорости преследователя, переведем координаты точки P_{tan} : $P_{tan.v} = \begin{bmatrix} (P_{tan} - P)v_1 \\ (P_{tan} - P)v_2 \end{bmatrix}$. Координаты преследователя в дискретный момент времени $P_{i.v}$ в системе координат (v_1, v_2) с началом в точке P будут равны

$$P_{i.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ |V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{tan.vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ -|V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{tan.vy} < 0. \end{cases}$$

Если угол α меньше, чем угол $\omega_P \Delta T$, то координаты точки $P_{i.v}$ будут выглядеть иначе:

$$P_{i.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ |V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{tan.vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ -|V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{tan.vy} < 0. \end{cases}$$

Угол α — это угол между вектором $P_{tan.v}$ и вектором v_1 . Далее следует перевести координаты $P_{i.v}$ из системы координат (v_1, v_2) в мировую. Для этого получим выражения для базиса (H_1, H_2) в базисе (v_1, v_2) :

$$h_{1.v} = \begin{bmatrix} H_1 v_1 \\ H_1 v_2 \end{bmatrix}; h_{2.v} = \begin{bmatrix} H_2 v_1 \\ H_2 v_2 \end{bmatrix},$$

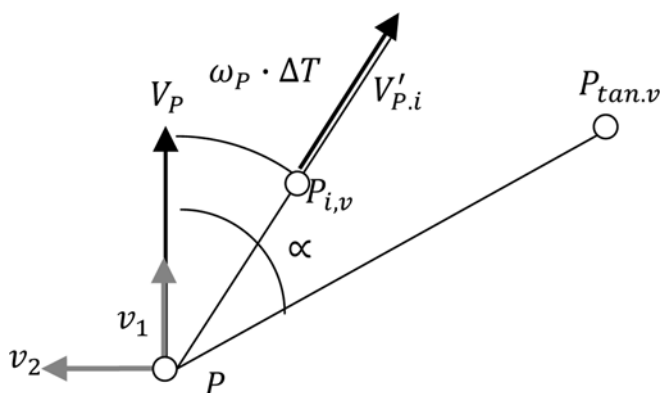


Рис. 3. Выбор направления движения преследователем

где $H_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $H_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Отсюда получаем выражения для точки преследователя P_i на следующем этапе итераций: $P_i = \begin{bmatrix} P_{i.v} h_{1.v} \\ P_{i.v} h_{2.v} \end{bmatrix} + P$. Итак, моделируемая траектория преследователя P_i приближается к прямой линии (P, P_{tan}) . Наша моделируемая траектория должна на определенных этапах итерационного процесса приближаться к сегменту дуги T, P_{tan} (см. рис. 1).

3. Анализ координат точек пересечения окружностей

Рассмотрим ситуацию, когда расстояние между преследователем P и центром окружности C_T меньше минимального радиуса кривизны траектории R_P (рис. 4). На рис. 4 показаны две пересекающиеся окружности с радиусами r_P и R_P , с центрами в точках P и C_T , соответственно, где $r_P = \omega_P \Delta T$, а R_P — минимальный радиус кривизны траектории преследователя. Целью задачи, описанной в данном разделе, является определение координат точки P_i в мировой системе координат на основе анализа точки P_{int} пересечения окружностей. Точку пересечения окружностей удобно получить в рассмотренной выше системе координат (e_1, e_2) с центром в точке P :

$$e_1 = \frac{C_T - P}{|C_T - P|}; e_2 = \begin{bmatrix} -e_{1y} \\ e_{1x} \end{bmatrix}.$$

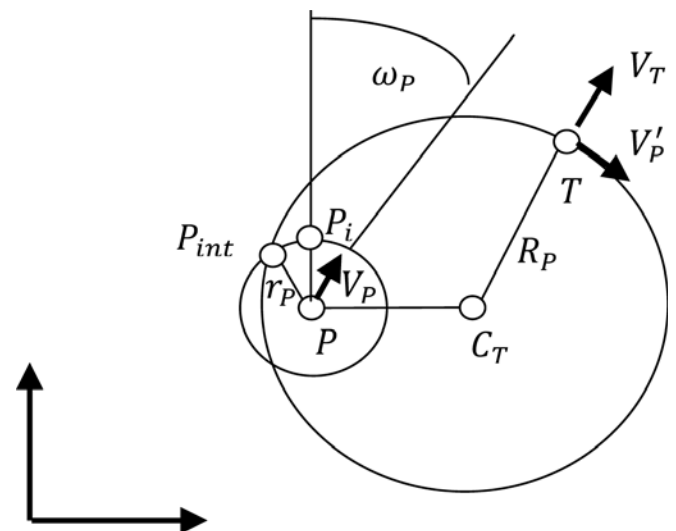


Рис. 4. Анализ координат точки пересечения окружностей

В этой системе координат выражения для точки пересечения окружностей $P_{int.n}$ имеют вид

$$P_{int.n} = \begin{bmatrix} \frac{C_X^2 - R_P^2 + r_P^2}{2C_X} \\ \pm \frac{\sqrt{(C_X + R_P - r_P)(C_X - R_P + r_P) \times (R_P - C_X + r_P)(R_P + C_X + r_P)}}{2C_X} \end{bmatrix}.$$

В нашей тестовой программе во внимание принята только верхняя точка (рис. 4) с положительным знаком в локальной системе координат. Переведем координаты $P_{int.n}$ в мировую систему координат:

$$P_{int} = \begin{bmatrix} P_{int.n} h_1 \\ P_{int.n} h_2 \end{bmatrix} + P.$$

Базисные векторы h_1 и h_2 имеют вид:

$$h_1 = \begin{bmatrix} H_1 e_1 \\ H_1 e_2 \end{bmatrix}; \quad h_2 = \begin{bmatrix} H_2 e_1 \\ H_2 e_2 \end{bmatrix},$$

где $H_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $H_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Для анализа точки пересечения окружностей необходимо перейти в систему координат (v_1, v_2) с началом координат в точке P (рис. 5):

$$v_1 = \frac{V_P}{|V_P|}; \quad v_2 = \begin{bmatrix} -v_{1y} \\ v_{1x} \end{bmatrix}.$$

В системе координат (v_1, v_2) координаты точки P_{int} равны

$$P_{int.v} = \begin{bmatrix} (P_{int} - P)v_1 \\ (P_{int} - P)v_2 \end{bmatrix}.$$

Угол α на рис. 5 — это угол между вектором $P_{int.v}$ и вектором v_1 .

Если угол $\alpha \geq \omega_P \Delta T$, то координаты $P_{i.v}$ в системе координат (v_1, v_2) с началом в точке P имеют вид

$$P_{i.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ |V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{int.vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ -|V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{int.vy} < 0. \end{cases}$$

Если угол $\alpha < \omega_P \Delta T$, то координаты точки $P_{i.v}$ будут выглядеть иначе:

$$P_{i.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ |V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{int.vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ -|V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } P_{int.vy} < 0. \end{cases}$$

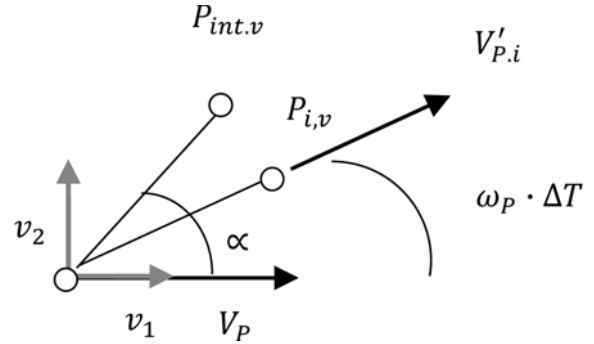


Рис. 5. Анализ, выполненный из системы координат преследователя

Далее следует перевести координаты $P_{i.v}$ из системы координат (v_1, v_2) в мировую. Для этого получим выражения для базиса (H_1, H_2) в базисе (v_1, v_2) :

$$h_{1.v} = \begin{bmatrix} H_1 v_1 \\ H_1 v_2 \end{bmatrix}; \quad h_{2.v} = \begin{bmatrix} H_2 v_1 \\ H_2 v_2 \end{bmatrix},$$

где $H_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $H_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$. Отсюда получаем выражения для точки преследователя P_i на следующем этапе итераций:

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{i.v} h_{1.v} \\ P_{i.v} h_{2.v} \end{bmatrix} + P.$$

Итак, мы разобрали часть алгоритма, в котором преследователь стремится выйти на дугу $\overline{P_{int}, T}$ (см. рис. 4).

4. Случай непересекающихся окружностей

Во избежание в нашем алгоритме неизвестных ситуаций рассмотрим случай, когда $|P - C_P| < R_P - r_P$. В этом случае мы вправе назначить точку P_{int} на оси (P, C_P) слева от точки P (рис. 6). Если рассматривать точку P_{int} из системы координат (e_1, e_2) с центром в точке C_T , то это точка $P_{int.n} = \begin{bmatrix} -R_P \\ 0 \end{bmatrix}$.

Необходимо рассчитать угол α между вектором V_P , приложенным к точке P , и вектором $\overline{P, P_{int}}$.

Если угол $\alpha < \omega_P \Delta T$, и точка T в системе координат (e_1, e_2) с центром в точке C_T находится в верхней полуплоскости, то координаты точки $P_{i.v}$ на следующем этапе итераций в системе координат (v_1, v_2) с началом в точке P имеют вид

$$P_{i.v} = \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ |V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}.$$

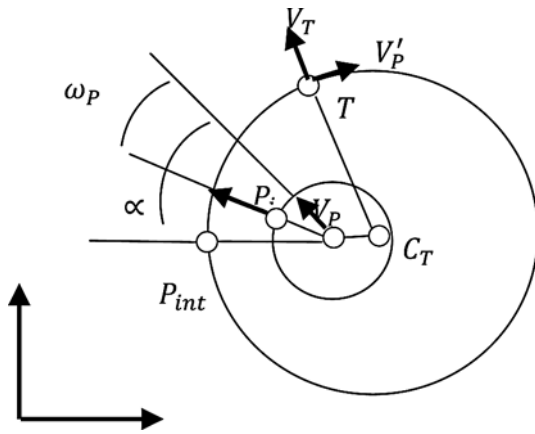


Рис. 6. Анализ случая непересекающихся окружностей

Если угол $\alpha < \omega_P \Delta T$, и точка T в системе координат (e_1, e_2) с центром в точке C_T находится в нижней полуплоскости, то

$$P_{i.v} = - \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ |V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}.$$

Если угол $\alpha \geq \omega_P \Delta T$, и точка T в системе координат (e_1, e_2) с центром в точке C_T находится в верхней полуплоскости, тогда координаты точки $P_{i.v}$ будут следующими:

$$P_{i.v} = \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ |V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}.$$

Если угол $\alpha \geq \omega_P \Delta T$, и точка T находится в нижней полуплоскости, то

$$P_{i.v} = - \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\omega_P \Delta T) \\ |V_P| \Delta T \sin(\omega_P \Delta T) \end{bmatrix}.$$

Следует отметить, в процессе моделирования данная ситуация встречалась в том случае, когда скорость преследователя намного превышала скорость цели. Также может повлиять низкая угловая скорость преследователя, т. е. цель на высокой скорости при большой инертности может попасть в ситуацию, когда $|P - C_P| < R_P - r_p$.

5. Цель и стратегия первого преследователя

Преследователь P_1 со скоростью V_1 имеет целью просто догнать объект T , что означает совмещение координат P_1 и T с некоторой степенью точности $|P_1 - T| \leq \varepsilon$. В качестве показателя точности можно предложить $\varepsilon = |V_1| \Delta T$, где ΔT — это период дискретизации по времени. Помимо этого объект P_1 обладает максимальной угловой скоростью вращения ω_1 , что огра-

ничивает радиус кривизны траектории движения $R_1 = \frac{|V_1|}{\omega_1}$.

Стратегия преследователя P_1 заключается в том, что координаты точки T пересчитываются в систему координат (v_1, v_2) с началом координат в точке P_1 (рис. 7):

$$v_1 = \frac{V_P}{|V_P|};$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} -v_{1y} \\ v_{1x} \end{bmatrix}.$$

В этой системе координат координаты точки T будут следующими:

$$T_v = \begin{bmatrix} (T - P_1)v_1 \\ (T - P_1)v_2 \end{bmatrix}.$$

Далее анализируем координаты точки T_v на принадлежность к верхней или нижней полуплоскости в системе координат (v_1, v_2) с началом координат в точке P_1 :

$$P_{1.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_1| \Delta T \cos(\omega_1 \Delta T) \\ |V_1| \Delta T \sin(\omega_1 \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } T_{vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_1| \Delta T \cos(\omega_1 \Delta T) \\ -|V_1| \Delta T \sin(\omega_1 \Delta T) \end{bmatrix}, & \text{если } T_{vy} < 0. \end{cases}$$

Необходимо, постоянно сравнивать значения углов $\omega_1 \Delta T$ и α , где α — это угол между векторами $\vec{P_1 T}$ и V_1 .

Если угол α меньше, чем угол $\omega_P \Delta T$, то координаты точки $P_{1.v}$ будут выглядеть иначе:

$$P_{i.v} = \begin{cases} \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ |V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } T_{vy} \geq 0; \\ \begin{bmatrix} |V_P| \Delta T \cos(\alpha) \\ -|V_P| \Delta T \sin(\alpha) \end{bmatrix}, & \text{если } T_{vy} < 0. \end{cases}$$

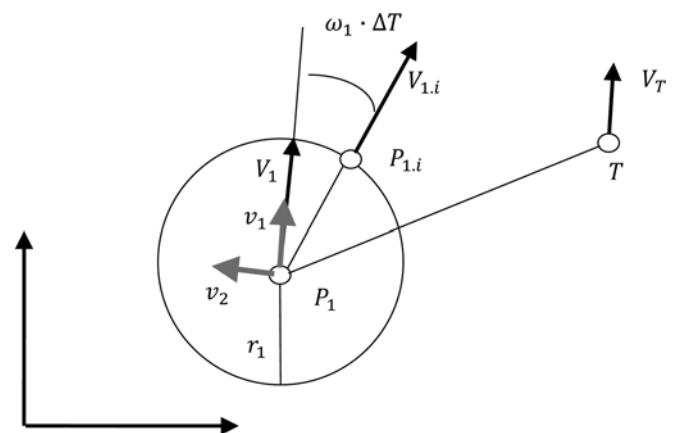


Рис. 7. Стратегия первого преследователя

6. Цели и стратегии второго и третьего объектов — преследователей

Преследователи P_2 и P_3 совершают движение со скоростями V_2 и V_3 , соответственно. Для объектов P_2 и P_3 целью является совмещение с определенной степенью точности ε не с точкой T , а с точками T_2 и T_3 , соответственно (рис. 8). Координаты точек T_2 и T_3 формируются следующим образом:

$$T_{2,3} = T + n_{2,3}.$$

Векторы нормалей

$$n_{2,3} = \pm \frac{1}{|V_T|} \begin{bmatrix} -V_{Ty} \\ V_{Tx} \end{bmatrix} \Delta S_{2,3},$$

где $\Delta S_{2,3}$ — это расстояния, на которые отстоят точки T_2 и T_3 от точки T .

Для траекторий объектов P_2 и P_3 выбирают такие условия, чтобы они подошли к точкам T_2 и T_3 с направлениями скоростей V'_2 и V'_3 . Радиусы кривизны траекторий не должны быть меньше $R_{2,3} = \frac{|V_{2,3}|}{\omega_{1,2}}$, где $\omega_{2,3}$ — максимальные угловые скорости вращения преследователей P_2 и T_3 .

Моделируемая траектория в некоторый момент времени состоит из прямолинейного участка $[P_{2,3}, P_{tan.2,3}]$ и сегмента дуги $P_{tan.2,3}, T_{2,3}$.

На каждом этапе итераций объекты P_2 и P_3 совершают дискретное вращение и дискретное поступательное перемещение, чтобы выйти на моделируемые траектории.

В нашей тестовой программе, написанной по материалам данного параграфа, объекты P_2 и P_3 , как только выходят на курс, параллельный курсу T , начинают двигаться со скоростями, равными V_T .

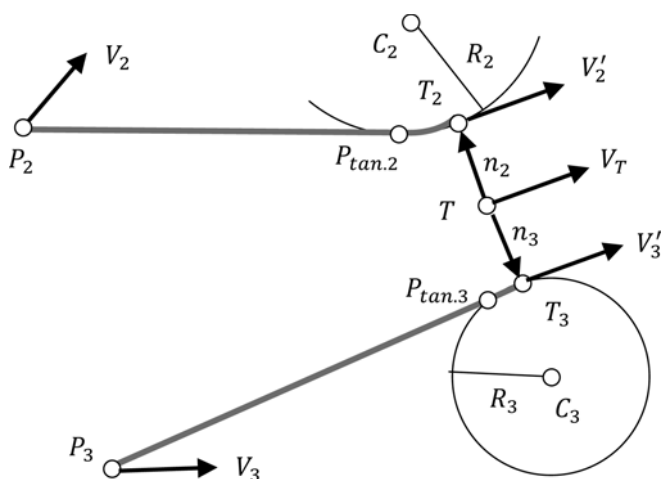


Рис. 8. Стратегии второго и третьего преследователей

7. Цель и стратегия четвертого преследователя

Рассмотрим четвертого участника из группы преследователей. Если первого участника можно квалифицировать как основного "загонщика", поведение второго и третьего преследователей можно квалифицировать как поведение помощников, не дающих ускользнуть цели, то роль четвертого преследователя можно трактовать как роль игрока из "засады".

На рис. 9 (см. вторую сторону обложки) показано два случая формирования траекторий четвертого преследователя. В первом случае траектория преследователя входит в точку положения непосредственно цели T , перпендикулярно ее скорости V_T . Во втором случае траектория преследователя входит в точку Q со скоростью, противоположно направленной скорости цели V_T . Точка Q расположена на прямой линии из точки T с образующей V_T .

Точку Q можно расположить в любой точке плоскости, никакие ограничения этого не запрещают. Просто цель может быть не достигнута.

При достижении точки Q можно поменять стратегию преследователя, допустим, сбросить скорость до 0 и ожидать приближения цели до расстояния меньше ε . Можно поменять стратегию при достижении точки Q на стратегию первого преследователя.

8. Цель и стратегия объекта преследования

Рассмотрим поведение объекта преследования. В нашей рассматриваемой модели целью объекта преследования выбрано отклонение от первого преследователя.

Рис. 10 иллюстрирует стратегию преследуемого объекта T . На этом рисунке объект T со скоростью V_T и с угловой скоростью вращения ω_T за период дискретизации ΔT совершает поворот на угол $\omega_T \Delta T$ и перемещение на расстояние $|T_i - T| = |V_T| \Delta T$.

Направление вращения точки T зависит от того, в какой полуплоскости находится преследователь P_1 .

Как альтернативную стратегию можно предложить стратегию, иллюстрация которой представлена на рис. 11.

На рис. 11 показано, что объект преследования T стремится свою скорость V_T сделать параллельной вектору скорости преследователя V_1 . Когда преследователь находится далеко, то предпочтительней для цели использовать стратегию параллельных скоростей, как на рис. 11.

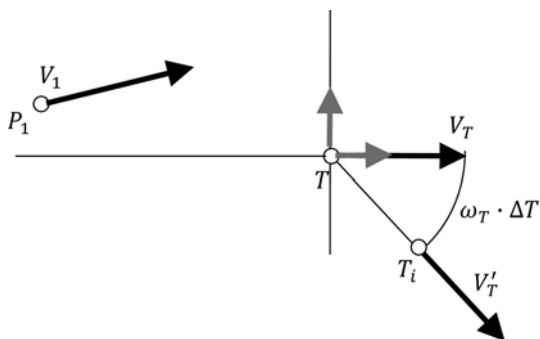


Рис. 10. Стратегия объекта преследования

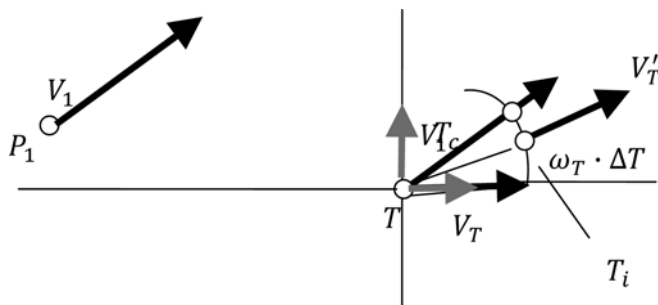


Рис. 11. Дополнительная стратегия объекта преследования

Когда преследователь подходит на дистанцию в нескольких шагов, т. е. для заключительного прыжка, для цели будет выгодна стратегия уклонения, как на рис. 11.

Заключение

На материалах, изложенных в данной главе, была написана тестовая программа в системе MathCAD, которая рассчитывает траектории группы из четырех преследователей и цели, уклоняющейся от них. У каждого участника геометрической модели своя цель и своя стратегия. На рис. 12 (см. вторую сторону обложки) показан скриншот с видео, где видно как один преследователь реализует погоню по следу. Два преследователя берут и сопровождают цель по параллельным траекториям. Один преследователь заходит перпендикулярно прогнозируемой траектории цели. В программе мы намеренно поменяли цель и стратегию четвертого преследователя, чтобы показать, что в рамках нашей программы это сделать достаточно просто, задав координаты точек входа и векторов входа в точки.

При написании данной статьи за основу приняты теоретические положения, изложенные в работах [1–6]. Описание алгоритма следования прогнозируемым траекториям, которых следует придерживаться, расположен на ресурсе [7]. Рис. 12 дополнен ссылкой на

ресурс [8], где размещено видео по результатам работы программы. Исходный текст программы размещен на ресурсе [9]. При разработке алгоритмов были проанализированы и использованы работы [10–18].

Список литературы

1. Айзекс Р. Дифференциальные игры. М.: Мир, 1967.
2. Понтрягин Л. С. Линейная дифференциальная игра убегания // Тр. МИАН СССР. 1971. Т. 112. С. 30–63.
3. Красовский Н. Н., Субботин А. И. Позиционные дифференциальные игры. М.: Наука, 1974.
4. Желнин Ю. Н. Линеаризованная задача преследования и уклонения на плоскости // Ученые записки ЦАГИ. 1977. № 3, Т. 8. С. 88–98.
5. Бурдаков С. В., Сизов П. А. Алгоритмы управления движением мобильным роботом в задаче преследования // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 6 (210). С. 49–58.
6. Симакова Э. Н. Об одной дифференциальной игре преследования // Автоматика и телемеханика. 1967. № 2. С. 5–14.
7. Алгоритм следования прогнозируемым траекториям в задаче преследования. URL: <http://dubanov.exponenta.ru> (дата обращения: 22.07.2019).
8. Видео, групповое преследование одиночной цели. Раздел "Групповое преследование с различными стратегиями одиночной цели". URL: <https://www.youtube.com/watch?v=aC4PuXTgVS0&feature=youtu.be>.
9. URL: <http://dubanov.exponenta.ru>
10. Вагин Д. А., Петров Н. Н. Задача преследования жестко скоординированных убегающих // Известия РАН. Теория и системы управления. 2001. № 5. С. 75–79.
11. Банников А. С. Некоторые нестационарные задачи группового преследования // Известия Института математики и информатики УдГУ. 2013. Вып. 1 (41). С. 3–46.
12. Банников А. С. Нестационарная задача группового преследования // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского. Казань: Изд-во Казанского математического общества. 2006. Т. 34. С. 26–28.
13. Измestьев И. В., Ухоботов В. И. Задача преследования маломаневренных объектов с терминальным множеством в форме кольца // Матер. междунар. конф. "Геометрические методы в теории управления и математической физике: дифференциальные уравнения, интегрируемость, качественная теория" Рязань, 15–18 сентября 2016 г., Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз., 148, ВИНТИ РАН, М., 2018. С. 25–31.
14. Константинов Р. В. О квазилинейной дифференциальной игре с простой динамикой при наличии фазового ограничения // Математические заметки. 2001. Т. 69, Вып. 4. С. 581–590.
15. Панкратова Я. Б. Решение кооперативной дифференциальной игры группового преследования // Дискретный анализ и исследование операций. 2010. Т. 17, № 2. С. 57–78.
16. Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Шевкопляс Е. В. Теория Игр. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 424 с.
17. Петросян Л. А., Рихсиев Б. Б. Преследование на плоскости. Изд-во Наука, 1991. 94 с.
18. Петросян Л. А., Томский Г. В. Геометрия простого преследования. М.: Наука, 1983. 143 с.

Model of Group Pursuit of a Single Target Based on Following Previously Predicted Trajectories

This article describes the geometric model when a group of pursuers pursues a single target. The movement occurs on a plane, but if necessary, this model can be transferred to a clearly defined surface. The speed of movement of all participants, both the pursuers and the target, is constantly modulo. The goals and strategies of each of the pursuers, despite the difference in trajectories, are united by one criterion. They strive to approach a point in space associated with the pursued object, under a given direction, observing restrictions on the curvature of the trajectory. The goal and strategy of the object of pursuit is determined by the behavior of one of the pursuers.

Keywords: pursuit, evasion, escape, modeling, algorithm, goal, pursuer, trajectory

DOI: 10.17587/it.26.334-341

References

1. Isaacs R. Differential games, Moscow, World, 1967 (in Russian).
2. Pontryagin L. S. Linear differential runaway game, *Tr. Steklov Mathematical Institute of the USSR*, 1971, vol. 112, pp. 30–63 (in Russian).
3. Krasovsky N. N., Subbotin A. I. Positional differential games, Moscow, Science, 1974 (in Russian).
4. Zhelnin Yu. N. The linearized problem of pursuit and evasion on the plane, *Uchenye zapiski TsAGI*, 1977, no. 3, vol. 8, pp. 88–98 (in Russian).
5. Burdakov S. V., Sizov P. A. Algorithms for controlling the movement of a mobile robot in the pursuit problem, *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University. Computer science. Telecommunications. Control*, 2014, no. 6 (210), pp. 49–58 (in Russian).
6. Simakova E. N. About one differential game of persecution, *Automation and Telemekhanics*, 1967, no. 2, pp. 5–14 (in Russian).
7. Algorithm for following the predicted trajectories in the pursuit problem, available at: <http://dubanov.exponenta.ru> (accessed: 07/22/2019) (in Russian).
8. Video, group pursuit of a single goal, available at: <https://www.youtube.com/watch?v=aC4PuXTgVS0&feature=youtu.be>.
9. Available at: <http://dubanov.exponenta.ru> Section "Group pursuit with various strategies of a single goal".
10. Vagin D. A., Petrov N. N. The pursuit of tightly coordinated runaways, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems*, 2001, no. 5, pp. 75–79 (in Russian).
11. Bannikov A. S. Some non-stationary problems of group pursuit, *Bulletin of the Institute of Mathematics and Computer Science*, Udmurt State University, 2013, iss. 1 (41), pp. 3–46 (in Russian).
12. Bannikov A. S. The non-stationary task of group pursuit, *Transactions of N. I. Lobachevsky, Kazan, Kazan Mathematical Society Publishing House*, 2006, vol. 34, pp. 26–28 (in Russian).
13. Izmetiev I. V., Ukhobotov V. I. The task of pursuing low-maneuverable objects with a terminal set in the form of a ring, *Materials of the international conference "Geometric methods in control theory and mathematical physics: differential equations, integrability, qualitative theory"*, Ryazan, September 15–18, 2016, Results of science and technology. Ser. Lying. mat. and her adj. Theme. review, 148, Moscow, VINITI RAS, 2018, pp. 25–31 (in Russian).
14. Konstantinov R. V. On a quasilinear differential game with simple dynamics in the presence of a phase constraint, *Mathematical Notes*, 2001, vol. 69, iss. 4, pp. 581–590. (in Russian).
15. Pankratova Ya. B. Solution of the cooperative differential game of group pursuit, *Discrete analysis and investigation of operations*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 57–78. (in Russian).
16. Petrosyan L. A., Zenkevich N. A., Shevkoplyas E. V. Game Theory, Saint Petersburg, Publishing House "BHV-Petersburg", 2012, 424 p. (in Russian).
17. Petrosyan L. A., Rikhsiev B. B. Harassment on the plane, Moscow, Publishing House of Science, 1991, 94 p. (in Russian).
18. Petrosyan L. A., Tomsy G. V. Geometry of simple pursuit, Moscow, Publishing House of Science, 1983, 143 p. (in Russian).

IV Международная конференция «УСТОЙЧИВОСТЬ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

Международная конференция «Устойчивость и процессы управления», посвященная 90-летию со дня рождения профессора, чл.-корр. РАН В. И. Зубова (1930—2000), будет проходить 5—9 октября 2020 г. в Санкт-Петербурге на базе факультета прикладной математики—процессов управления Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ).

Организатор конференции
Председатель конференции

Санкт-Петербургский государственный университет
Петросян Леон Аганесович, профессор СПбГУ

Научные направления конференции

- Устойчивость
- Метод функций Ляпунова
- Теория динамических систем
- Управление механическими системами
- Управление и оптимизация в электрофизических системах
- Управление конфликтными системами. Динамические игры
- Методы анализа и синтеза систем с последствием
- Робастность
- Методы оптимизации
- Нелинейная механика и физика твердого тела
- Управление социально-экономическими системами
- Управление медико-биологическими системами
- Информатика и процессы управления
- Математические проблемы и методы распознавания образов
- Искусственный интеллект

Контактная информация:

Егоров Алексей Валерьевич, alexey.egorov@spbu.ru
Головкина Анна Геннальевна, a.golovkina@spbu.ru

Официальный сайт конференции

<http://www.apmath.spbu.ru/scp2020/>

А. С. Акопов^{1,2}, д-р техн. наук, проф. кафедры бизнес-аналитики¹, гл. науч. сотр.², e-mail: aakopov@hse.ru,

Л. А. Бекларян², д-р физ.-мат. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: beklar@cemi.rssi.ru,

Н. К. Хачатрян^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики¹, ст. науч. сотр.²,
e-mail: nerses@cemi.rssi.ru; nkhattryan@hse.ru,

А. Л. Бекларян¹, канд. техн. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики, e-mail: abeklaryan@hse.ru,

Е. В. Кузнецова¹, канд. экон. наук, доц. кафедры бизнес-аналитики, e-mail: ev.kuznetsova@hse.ru,

¹Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Центральный экономико-математический Институт РАН

Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами*

Представлена система управления наземными беспилотными транспортными средствами (БТС), разработанная с использованием методов агентного имитационного моделирования (поддерживаемых в AnyLogic). Важной особенностью подобной системы является возможность оценки влияния различных параметров (таких как средние начальные скорости, интенсивности входных потоков, частота обмена данными между агентами-БТС и др.) на поведение и состояние беспилотных и обычных транспортных средств в плотном потоке. Исследованы эффекты "турбулентности" и "дорожных заторов", обусловленные преимущественно высокой плотностью транспортных средств, возникновением дорожно-транспортных происшествий и др.

Выполнена программная реализация разработанной имитационной модели в среде AnyLogic и проведены численные эксперименты. Найдены режимы, обеспечивающие безопасное и скоростное движение транспортных средств в плотном потоке.

Ключевые слова: многоагентная система, беспилотные транспортные системы, интеллектуальная транспортная система, AnyLogic

Введение

В настоящее время актуализируется задача разработки новых интеллектуальных систем управления ансамблем наземных беспилотных транспортных средств (БТС) в целях обеспечения скоростного и безопасного трафика, максимизации пропускной способности транспортной системы и минимизации числа факторов (например, возникающих дорожно-транспортных происшествий (ДТП)), несущих угрозы другим участникам дорожного движения.

В качестве примеров инцидентов с наземными БТС можно упомянуть аварию с беспилотным автомобилем компании Google в 2016 г., когда, перестраиваясь в левый ряд, беспилот-

ник не уступил дорогу автобусу, смертельные ДТП с участием беспилотных автомобилей Tesla в 2016 и 2018 гг., вызванные принципиальными ошибками при оценке дорожной ситуации¹, другие аварии, связанные с использованием систем автопилотирования, в том числе случившиеся на территории РФ² и др. Относительно небольшое число подобных аварий объясняется в основном незначительным числом БТС, эксплуатируемых в настоящее время. Однако по оценкам различных экспертов³ уже к 2028 г. доля роботизированных транспортных средств в общем объеме мировых продаж составит не менее 13 %. В связи с вышеизложенным актуа-

¹<https://www.kommersant.ru/doc/3792047>.

²<https://tass.ru/proisshestiya/6752573>.

³<https://bespilot.com/sprojects/139->.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06003.

лизируется задача проектирования интеллектуальных систем управления ансамблем БТС, нацеленных на обеспечение минимизации рисков для участников дорожного движения в интенсивном транспортном потоке. Подобные системы могут, в частности, осуществлять адаптивное управление множественными характеристиками БТС в зависимости от складывающейся транспортной ситуации (например, варьировать скоростной режим, выбирать превалирующее направление движения с учетом "дорожных заторов" и ДТП и др.). Сложность проектирования таких систем обусловлена, во-первых, высокой размерностью соответствующих компьютерных моделей, а во-вторых, необходимостью принятия решений на индивидуальном уровне каждого объекта, движущегося в потоке с учетом их коммуникационных возможностей и характеристик внешней среды (например, геометрии проезжей части). Поэтому необходимо применять методы агентного имитационного моделирования и, в частности, феноменологический подход, учитывающий как психологические особенности поведения обычных водителей, так и специфическую реакцию роботизированной системы управления БТС на внешние события. При этом поведение ансамбля подобных транспортных средств можно сравнить с поведением людской толпы в условиях отсутствия (равномерный трафик) и наличия чрезвычайных ситуаций (возникновение множественных ДТП) с учетом существенно более сложных (регламентируемых) правил принятия решений на индивидуальном уровне каждого агента и возможностей использования современных коммуникационных возможностей (в частности, технологий передачи данных 5G).

К наиболее важным исследованиям в данной области следует отнести работы Дирка Хелбинга, который в своей статье, опубликованной в журнале Nature [1], систематизировал ряд явлений, характерных для толпы, таких как образование пробок, вовлечение новых людей в панику и других, основанных исключительно на описании поведения и взаимодействия агентов, а также идентифицировал потенциалы сил, соответствующие данным явлениям, в рамках ньютоновской механики (молекулярный подход). В предложенных Д. Хелбингом моделях [3, 4] развиваются методы молекулярной динамики, при этом психологическим и социальным факторам придаются смыслы потенциалов взаимодействия между молекулами-людьми. В дальнейшем методы, предложенные Д. Хелбингом, применялись,

в частности, для идентификации состояния автомобильного трафика на основе неполной информации [5], для развития трехфазной теории возникновения и диссипации пробок на автострадах, разработанной ранее Б. Кернером [6, 7], для построения высокопродуктивных самоорганизующихся сетей междугородной телекоммуникации [8] и др. Среди результатов российских ученых в области проектирования интеллектуальных транспортных систем следует выделить работы [9, 10].

Тем не менее, несмотря на существенные достижения в области моделирования транспортных потоков по-прежнему актуально применение агент-ориентированного, в частности феноменологического, подхода для исследования поведения ансамбля взаимодействующих транспортных средств с использованием существенно более простого аналогового описания состояний агентов и их взаимодействий. Подобный феноменологический подход был предложен в работах А. С. Аكوпова, Л. А. Бекларяна [11, 12] для исследования поведения толпы в условиях наличия или отсутствия чрезвычайных ситуаций. Важным преимуществом такого подхода является описание правил взаимодействия различных агентов друг с другом и внешней средой в рамках итоговой системы принятия решений отдельными агентами без необходимости проведения сложной вычислительной процедуры идентификации потенциалов различных сил системы в целом. В частности, такие правила могут быть описаны с помощью систем дифференциальных уравнений с переменной структурой, учитывающей все многообразие возможных взаимодействий и коллизий (потенциальных столкновений) между различными (движущимися или стационарными) объектами. Важнейшей характеристикой подобного подхода является определение понятия личного пространства агента, лежащего в основе возникновения и развития эффектов "турбулентности" и "давки" в условиях высокой и сверхвысокой плотности людских или транспортных потоков.

Принципиальным развитием феноменологического подхода является расширение индивидуальной системы принятия решений каждого агента за счет анализа влияний множественных дополнительных факторов, например, плотности агентов в выбранном секторе обзора, расстояния между агентами, изменения агентом направления собственного движения и др. Такое уточнение является в определенной степени развитием системы принятия решений,

представленной ранее в работе Г. Антонини [13], базирующейся на анализе ситуации в рамках сектора обзора агента с углом развертки, составляющим примерно 170° . В результате каждый агент осуществляет выбор той альтернативы, при которой достигается минимальное значение целевого функционала, учитывающего влияние множественных факторов (прежде всего плотности окружающих агентов, удаленности от внешних стен и барьеров и др.). В дальнейшем подобный подход получил свое развитие в работах А. Л. Бекларяна, А. С. Акопова, относящихся к разработке методов нечеткой кластеризации толпы в условиях чрезвычайных ситуаций [14].

К сожалению, вычисление и минимизация подобного целевого функционала на уровне каждого агента представляет собой сложную задачу, требующую значительных вычислительных ресурсов. Поэтому для исследования поведения сложных (крупномасштабных) интеллектуальных транспортных систем наиболее рациональным представляется комбинирование расширенного феноменологического подхода с индивидуальной системой принятия решений, основанной на адаптивном управлении дирекционными углами, скоростными и прочими характеристиками, в том числе на основе информации, поступающей от других агентов.

В данной статье представлена разработка многоагентной интеллектуальной системы управления ансамблем наземных БТС, взаимодействующих с другими участниками дорожного движения, для обеспечения безопасного и скоростного трафика за счет выбора наилучших режимов функционирования и взаимодействия наземных БТС с учетом реальной (в частности, комбинированной) конфигурации проезжей части.

1. Модель поведения обычных и беспилотных транспортных средств

Разработанная модель движения наземных обычных транспортных средств (ОТС) и БТС, основана на использовании методов агентного имитационного моделирования для реализации правил поведения и взаимодействия соответствующих агентов на индивидуальном уровне.

В модели рассматривается эволюционная динамика двух популяций агентов:

- ОТС, управляемые людьми;
- наземные БТС с полностью роботизированным управлением.

Принципиальным отличием наземных БТС от ОТС является поддержка периодического (при условии отсутствия технических сбоев) информационного обмена между всеми движущимися БТС в целях обеспечения передачи сведений о наличии любых экстремальных ситуаций, в частности, в случае возникновения ДТП с участием БТС или ОТС. Подобные сведения используются для обеспечения адаптивного управления важнейшими характеристиками БТС, в частности, средней скоростью и направлением движения. Также могут передаваться сведения о наличии дорожных заторов (пробок), мелких и крупных аварий, неработающих светофорах и др.

Важной особенностью предложенной модели является использование понятия радиуса личного пространства агента (впервые предложенного в работах [9, 10] и лежащего в основе эффектов "турбулентности" и "давки"), являющегося функцией плотности потока транспортных средств, определяемой как общее число транспортных средств, окружающих (т.е. находящихся в непосредственной близости) данного агента.

Для упрощения анализа входные и выходные потоки ОТС и БТС в модели разделены и смешиваются (взаимодействуют) только в рамках кругового движения.

Пусть

T — набор временных моментов (в минутах); $|T|$ — общее число временных моментов; $t_0 \in T$, $t_{|T|} \in T$ — начальные и конечные моменты времени; $t_k \in T$, $k = 0, \dots, |T|$ — все индексы моментов времени;

$I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ — набор индексов обычных (не являющихся беспилотными) агентов, где $|I|$ — общее число ОТС;

$\tilde{I} = \{1, 2, \dots, |\tilde{I}|\}$ — набор индексов наземных БТС, где $|\tilde{I}|$ — общее число наземных БТС.

Тогда плотность потока транспортных средств относительно некоторого j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) определяется равенством

$$\rho_j(t_k) = \chi_I(j) \sum_{i \in I \cup \tilde{I}} m_{ji}(t_k) + \chi_{\tilde{I}}(j) \sum_{i \in I \cup \tilde{I}} \tilde{m}_{ji}(t_k), \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} m_{ji}(t_k) &= \begin{cases} 1, & \text{если } d_{ji}(t_k) \leq r; \\ 0, & \text{если } d_{ji}(t_k) > r; \end{cases} \\ \tilde{m}_{ji}(t_k) &= \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{d}_{ji}(t_k) \leq r; \\ 0, & \text{если } \tilde{d}_{ji}(t_k) > r, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\{d_{ji}(t_k), \tilde{d}_{ji}(t_k)\}$ — оцениваемое расстояние до i -го агента ($i \in I \cup \tilde{I}$) от данного j -го агента для $j \in I$ и $j \in \tilde{I}$ соответственно, в момент времени t_k ($t_k \in T$) (заметим, что $\tilde{d}_{ji}$ совпадает с евклидовым расстоянием), а r — радиус обзора для оценки плотности размещения транспортных средств, являющийся параметром системы.

Радиус личного пространства j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$):

$$r_j(t_k) = \begin{cases} \hat{r}, & \text{если } \rho_j(t_k) = 1, \\ \frac{\hat{r}}{(\rho_j(t_k))^\eta}, & \text{если } 1 < \rho_j(t_k) < \bar{\rho}, \\ \frac{\gamma \hat{r}}{(\rho_j(t_k))^\eta}, & \text{если } \bar{\rho} \leq \rho_j(t_k) < \bar{\bar{\rho}} \\ (\gamma \leq 1, \text{ если } j \in \tilde{I}; \gamma > 1, \text{ если } j \in I), \\ 0, & \text{если } \bar{\bar{\rho}} \leq \rho_j(t_k). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\hat{r}$ — начальное значение радиуса личного пространства агента, соответствующее нормальному состоянию плотности окружающего пространства (*при отсутствии паники*); $0 \leq \eta \leq 1$ — некоторый фиксированный коэффициент ($\eta = 0,2$); γ — значение коэффициента сжатия (расширения) личного пространства агента, соответствующее состоянию высокой плотности окружающего пространства (*при наличии паники*); $\{\bar{\rho}, \bar{\bar{\rho}}\}$ — пороговые значения плотностей окружающего пространства, определяющие состояния возникновения паники и "давки" (аварии ТС) соответственно. График радиуса личного пространства представлен на рис. 1.

Таким образом, поведение транспортных средств в потоке зависит от плотности окружающего пространства. При увеличении плотности потока радиус личного пространства агента сжимается (то есть происходит уплотнение транспортного потока). Однако после достижения некоторого порогового значения плотности ($\bar{\rho}$) радиус личного пространства агента существенно увеличивается у ОТС вследствие возникновения паники и частично уменьшается у наземных БТС вследствие предопределенного стремления избежать столкновения с уплотнившимся транспортным потоком.

Далее будем рассматривать движение ансамбля как ОТС, так и БТС в некотором двумерном пространстве, представляющем собой комбинацию из кругового движения с двумя въездами и двумя съездами с круга (рис. 2).

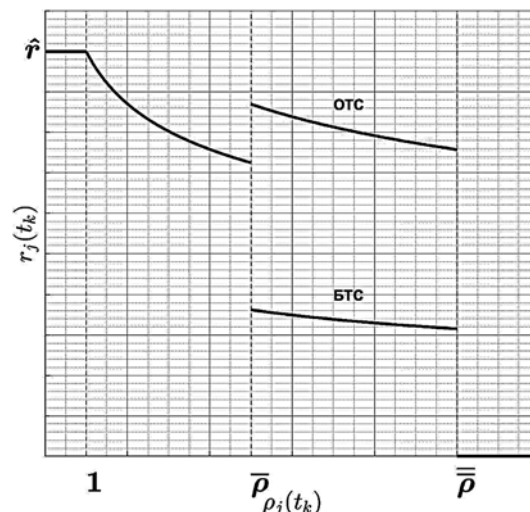


Рис. 1. График радиуса личного пространства

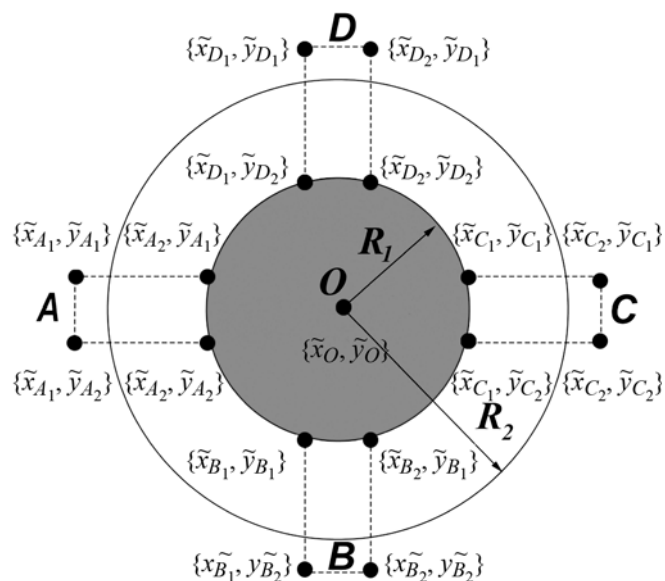


Рис. 2. Конфигурация пространства движения обычных и беспилотных ТС

На рис. 2 литерами **A**, **B** обозначены зоны въезда на круг, а литерами **C**, **D** — зоны съезда с круга для БТС и ОТС соответственно.

При этом задаются координаты центра зоны кругового движения $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ и следующие координаты зон въезда на круг:

$$A(\{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_1}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_1}\}, \{\hat{x}_{A_2}, \hat{y}_{A_2}\}),$$

$$B(\{\hat{x}_{B_1}, \hat{y}_{B_2}\}, \{\hat{x}_{B_1}, \hat{y}_{B_1}\}, \{\hat{x}_{B_2}, \hat{y}_{B_1}\}, \{\hat{x}_{B_2}, \hat{y}_{B_2}\})$$

и выезда с круга:

$$C(\{\hat{x}_{C_1}, \hat{y}_{C_2}\}, \{\hat{x}_{C_1}, \hat{y}_{C_1}\}, \{\hat{x}_{C_2}, \hat{y}_{C_1}\}, \{\hat{x}_{C_2}, \hat{y}_{C_2}\}),$$

$$D(\{\hat{x}_{D_1}, \hat{y}_{D_2}\}, \{\hat{x}_{D_1}, \hat{y}_{D_1}\}, \{\hat{x}_{D_2}, \hat{y}_{D_1}\}, \{\hat{x}_{D_2}, \hat{y}_{D_2}\}),$$

а также радиусы внутреннего R_1 и внешнего R_2 пространства размещения агентов, определяю-

щие зону кругового движения, доступную для ТС. Для каждого j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$), находящегося на круге в нормальном (т.е. неаварийном) состоянии в каждый момент времени t_k ($t_k \in T$), действует ограничение: $R_1 < d_{jO}(t_k) < R_2$, где $d_{jO}(t_k)$ — евклидово расстояние от j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$), до центра зоны кругового движения с координатами $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$). В случае невыполнения данного условия соответствующий агент находится либо в состоянии въезда на круг, либо выезжает с круга, либо находится в аварийном состоянии.

Пусть

- $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$ — координаты ОТС или БТС ($i \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $s_i(t_k) \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ — возможные состояния ОТС или БТС ($i \in I \cup \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$): 0 — круговое движение, 1 — аварийное состояние (ДТП), 2 — въезд на круг, 3 — съезд с круга, 4 — конечное состояние выезда из зоны кругового движения.

Совокупный трафик, определяющий общее число ТС, покинувших зону кругового движения к конечному моменту времени $|T|$:

$$N = \sum_{t_k=1}^{|T|} \left(\sum_{i \in I} n_i(t_k) + \sum_{i \in \tilde{I}} \tilde{n}_i(t_k) \right), \quad (4)$$

где

$$n_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_i(t_k) > \hat{y}_{D_1} \text{ и } s_i(t_{k-1}) = 3, \\ 0, & \text{если } y_i(t_k) \leq \hat{y}_{D_1} \text{ и } s_i(t_{k-1}) \neq 3; \end{cases}$$

$$\tilde{n}_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i(t_k) > \hat{x}_{C_2} \text{ и } s_i(t_{k-1}) = 3, \\ 0, & \text{если } x_i(t_k) \leq \hat{x}_{C_2} \text{ и } s_i(t_{k-1}) \neq 3, \end{cases}$$

$t_k \in T$.

Будем считать, что все аварии (ДТП) обусловлены двумя причинами:

- *столкновением ОТС* во время кругового движения, а также при попытках въезда и выезда из зоны кругового движения, т.е. $s_i(t_k) = 1$ ($i \in I$), если существует хотя бы один j -й агент ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), для которого расстояние между ними удовлетворяет условию $d_{ij}(t_k) < \underline{r}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$), где $\underline{r}$ — минимально допустимое расстояние между агентами без столкновения. Аналогичное правило выполняется и для БТС, т.е. $s_i(t_k) = 1$ ($i \in \tilde{I}$), если существует хотя бы один j -й агент ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), для которого евклидово расстояние между ними также удовлетворяет условию $d_{ij}(t_k) < \underline{r}$ в момент времени t_k .
- *выталкиванием ТС* за зону кругового движения вследствие возникновения эффектов

"турбулентности" и "давки", обусловленных высокой плотностью транспортного потока, т.е. $s_i(t_k) = 1$, если евклидово расстояние $\tilde{d}_{iO}(t_k)$ между i -м агентом ($i \in I \cup \tilde{I}$) и центром зоны кругового движения с координатами $\{\hat{x}_O, \hat{y}_O\}$ удовлетворяет условиям: ($\tilde{d}_{iO}(t_k) < R_1$ или $\tilde{d}_{iO}(t_k) > R_2$) и $s_i(t_{k-1}) = 0$.

Число аварий (ДТП), случившихся к конечному моменту времени $|T|$:

$$M = \sum_{t_k=1}^{|T|} \left(\sum_{i \in I \cup \tilde{I}} m_i(t_k) \right), \quad (5)$$

где

$$m_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_i(t_{k-1}) = 1 \text{ и } s_i(t_{k-2}) = 0 \\ \text{при } k > 1; \\ 0, & \text{если } s_i(t_{k-1}) \neq 1. \end{cases}$$

Важным отличием индивидуальных правил принятия решений для БТС является периодическая передача информации о состоянии каждого i -го агента ($i \in \tilde{I}$) всем другим БТС. В случае, если данное БТС находится в аварийном состоянии (т.е. $s_i(t_k) = 1$) или находится в непосредственной близости от ДТП, то точные координаты данного агента высылаются другим агентам с заданной интенсивностью $0 \leq f_i \leq 1$. При этом время между передачей подобных сообщений является случайной величиной с экспоненциальным распределением со средним значением $1/f_i$.

Пусть

- $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ — координаты j -го ($j \in \tilde{I}$) агента-БТС, находящегося в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$), информация о котором известна всем другим БТС, в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ — ориентировочные координаты j -го ($j \in I$) агента-ОТС, находящегося в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$), информация о котором известна БТС, в момент времени t_k ($t_k \in T$);
- $\tilde{d}_{ij}(t_k)$ — евклидово расстояние между БТС ($i \in \tilde{I}$), находящимся в нормальном состоянии ($s_i(t_k) = 0$), и ближайшим БТС ($j \in \tilde{I}$), находящимся в аварийном состоянии ($s_j(t_k) = 1$);
- $\tilde{d}_{ij}(t_k)$ — евклидово расстояние между БТС ($i \in I$), находящимся в нормальном состоянии, и приблизительными ближайшими координатами возникновения ДТП с участием ОТС ($j \in I$). Координаты подобных ДТП определяются БТС в случае нахождения в зоне прямой видимости от соответствующих аварий;
- $\bar{R}$ — пороговое расстояние (для принятия решения о корректировке маршрута и тор-

можения) между БТС находящимся в нормальном и БТС, находящимся в аварийном состоянии ($\bar{R} \gg r_i, i \in \tilde{I}$), с известными координатами $\{\hat{x}_j(t_k), \hat{y}_j(t_k)\}$ ($j \in \tilde{I}, t_k \in T$);

- $\bar{R}$ — пороговое расстояние (для принятия решения о торможении) между БТС, находящимся в нормальном состоянии, и предполагаемым местом возникновения ДТП с участием ОТС ($\bar{R} \gg r_i, i \in \tilde{I}$), с известными координатами $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ ($j \in I, t_k \in T$);
- $g_i(t_k) \in [\hat{g}_i(t_k) - \delta g, \hat{g}_i(t_k) + \delta g]$ — скорость перемещения i -го агента ($i \in I$) (ОТС), представляющая собой случайную величину, равномерно распределенную на отрезке $[\hat{g}_i(t_k) - \delta g, \hat{g}_i(t_k) + \delta g]$, $\hat{g}_i(t_k)$, δg — предпочтительная скорость и максимальное отклонение от этой скорости для ОТС соответственно;
- $g_i(t_k) \in N(\hat{h}_i(t_k), \delta h)$ — скорость перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$) (БТС), представляющая собой случайную величину, распределенную по гауссовскому закону с математическим ожиданием $\hat{h}_i(t_k)$ и дисперсией δh ;
- $\{\lambda, \hat{\lambda}\}$ — коэффициенты, определяющие соотношения масштабов реального и виртуального модельного времени для ОТС и БТС соответственно для каждого временно-го интервала $[t_k, t_{k+1}]$ ($t_k \in T$);
- $\{c_1, c_2\}$ — коэффициенты, определяющие интенсивность изменения направления движения (нежелание двигаться в данном направлении) соседних агентов друг от друга и от места возникновения ДТП (для БТС) соответственно;

С учетом введенных обозначений, пространственная динамика обычного i -го агента ($i \in I$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) задается следующей системой разностных уравнений с переменной структурой, при этом агенты в состоянии $s_i(\xi) = 4$ на следующем шаге перестают присутствовать в системе:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется I,} \\ \hat{x}_O + d_{iO}(t_{k-1}) \cos \alpha_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ x_i(t_{k-1}) + \cos(\alpha_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \\ 0, & \text{если выполняется V,} \end{cases} \quad (6)$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}) - \lambda g_i, & \text{если выполняется I,} \\ \hat{y}_O + d_{iO}(t_{k-1}) \sin \alpha_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется II,} \\ y_i(t_{k-1}) + \sin(\alpha_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{d_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется III,} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется IV,} \\ 0, & \text{если выполняется V,} \end{cases} \quad (7)$$

где

- $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 3\}$,
- $d_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$,
- $d_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$,
- $s_i(t_{k-1}) = 1$,
- $s_i(t_{k-1}) = 4$.

Дирекционный угол перемещения i -го агента ($i \in I$), находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$:

$$\alpha_i(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \lambda \frac{g_i}{d_{iO}(t_{k-1})}, \quad (8)$$

где

$$\beta_{iO}(t_{k-1}) = \arctan \frac{y_i(t_{k-1}) - \hat{y}_O}{x_i(t_{k-1}) - \hat{x}_O}. \quad (9)$$

Угол смещения i -го агента ($i \in I$) для объезда ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$) равен

$$\omega_{ij}(t_{k-1}) = \frac{\pi}{4} + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \sin \frac{\pi}{4}}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \cos \frac{\pi}{4}} \right|. \quad (10)$$

Угол "отскока" i -го агента ($i \in I$) от ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$) составляет

$$\gamma_{ij}(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|. \quad (11)$$

Отметим, что в отличие от ОТС БТС характеризуются более сложной системой принятия решений, учитывающей возможности периодического обмена данными с другими роботизированными участниками дорожного движения, обеспечивающего, в частности, наличие полной или частичной информации

о складывающейся ситуации (например о местах возникновения ДТП).

С учетом вышеизложенного пространственную динамику беспилотного i -го агента ($i \in \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) можно описать следующей системой разностных уравнений с переменной структурой:

$$x_i(t_k) = \begin{cases} x_i(t_{k-1}) + \tilde{\lambda} g_i, & \text{если выполняется VI;} \\ \hat{x}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \cos \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VII;} \\ x_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \cos \tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VIII;} \\ x_i(t_{k-1}) + \cos(\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется IX;} \\ x_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \cos \gamma_{ij}^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется X;} \\ x_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI;} \\ 0, & \text{если выполняется XII;} \end{cases} \quad (12)$$

$$y_i(t_k) = \begin{cases} y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется VI;} \\ \hat{y}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \sin \tilde{\alpha}_i(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VII;} \\ \hat{y}_O + \tilde{d}_{iO}(t_{k-1}) \sin \tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется VIII;} \\ y_i(t_{k-1}) + \sin(\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) \pm \omega_{ij}(t_{k-1})) + \\ + \frac{c_1}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}(t_{k-1}), & \text{если выполняется IX;} \\ y_i(t_{k-1}) + \frac{c_2}{\tilde{d}_{ij}(t_{k-1})} \sin \gamma_{ij}^*(t_{k-1}), & \\ \text{если выполняется X;} \\ y_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI;} \\ 0, & \text{если выполняется XII;} \end{cases} \quad (13)$$

где

VI. $s_i(t_{k-1}) \in \{2, 3\}$;

VII. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ и $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ для всех $j \in \tilde{I}$, $l \in I$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$, $s_l(t_{k-1}) = 1$;

VIII. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$,

$\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq \tilde{R}$ для ближайшего $j \in I$, $s_j(t_{k-1}) = 1$;

IX. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для ближайшего $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и

$\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ и $\tilde{d}_{il}(t_{k-1}) > \tilde{R}$ для всех $j \in \tilde{I}$, $l \in I$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$, $s_l(t_{k-1}) = 1$;

X. $\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) > r_i(t_{k-1}) + r_j(t_{k-1})$ для всех $j \in I \cup \tilde{I}$, $i \neq j$ и $s_i(t_{k-1}) = 0$ и

$\tilde{d}_{ij}(t_{k-1}) \leq \tilde{R}$ для ближайшего $j \in \tilde{I}$, $i \neq j$, $s_j(t_{k-1}) = 1$;

XI. $s_i(t_{k-1}) = 1$;

XII. $s_i(t_{k-1}) = 4$.

Здесь

$\tilde{\alpha}_i(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \tilde{\lambda} \frac{g_i}{\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})}$ — дирекционный угол перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$),

находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$, при условии отсутствия потенциального препятствия в виде ОТС в аварийном состоянии, где

$$\beta_{iO}(t_{k-1}) = \arctan \frac{y_i(t_{k-1}) - \hat{y}_O}{x_i(t_{k-1}) - \hat{x}_O},$$

угол смещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$) для объезда ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$) составляет

$$\omega_{ij}(t_{k-1}) = \frac{\pi}{4} +$$

$$+ \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \sin \frac{\pi}{4}}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1}) + (r_j(t_{k-1}) + r_i(t_{k-1})) \cos \frac{\pi}{4}} \right|;$$

$\tilde{\alpha}_i^*(t_{k-1}) = \beta_{iO}(t_{k-1}) - \tilde{\lambda} \frac{\varpi g_i}{\tilde{d}_{iO}(t_{k-1})}$ — дирекционный

угол перемещения i -го агента ($i \in \tilde{I}$), находящегося в состоянии кругового движения $s_i(t_{k-1}) = 0$ при условии нахождения данного агента в районе ДТП с известными координатами $\{\tilde{x}_j(t_k), \tilde{y}_j(t_k)\}$ ($j \in I$, $t_k \in T$), где ϖ — коэффициент, определяющий уровень снижения средней скорости наземного БТС ($\varpi = 0,1$);

$\gamma_{ij}(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{y_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{x_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|$ — угол

"отскока" i -го агента ($i \in \tilde{I}$) от ближайшего j -го агента ($j \in I \cup \tilde{I}$, $j \neq i$), находящегося в нормальном состоянии;

$\gamma_{ij}^*(t_{k-1}) = \pi + \left| \arctan \frac{\hat{y}_j(t_{k-1}) - y_i(t_{k-1})}{\hat{x}_j(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1})} \right|$ — угол

"отскока" i -го агента ($i \in \tilde{I}$), находящегося в нормальном состоянии кругового движения ($s_i(t_k) = 0$) от ближайшего j -го БТС ($j \in \tilde{I}$, $j \neq i$), находящегося в аварийном состоянии, с известными координатами $\{\hat{x}_j(t_{k-1}), \hat{y}_j(t_{k-1})\}$ ($j \in \tilde{I}$, $t_k \in T$).

В текущей реализации системы принятия решений как ОТС, так и БТС наиболее существенным фактором выступает расстояние до ближайшего агента. Вместе с тем, для БТС возможны правила принятия решений, основанные на предиктивном анализе состояния всей системы в целом. Такой подход будет реализован в рамках дальнейшего развития модели.

Далее будет представлена программная реализация предложенной модели движения агентов (1)–(13) в AnyLogic.

Программная реализация модели в AnyLogic

Предложенная модель движения наземных ОТС и БТС была реализована в системе имитационного моделирования *AnyLogic*, поддерживающей методы агентного имитационного моделирования. Для реализации правил перехода к различным состояниям ОТС и БТС используются специальные возможности системы *AnyLogic*, относящиеся к применению карт состояний (statecharts). Подобные карты состояний, функционирующие по принципам конечного автомата, позволяют управлять состояниями агентов и переходами между ними на индивидуальном уровне в зависимости от выполнения некоторых условий. Например, "въезд автомобиля на круг" является начальным состоянием данного агента, которое задается в момент его создания как объекта транспортной системы. Далее осуществляется переход к новому состоянию агента — "круговому движению", при условии, что транспортное средство достигло середины проезжей части зоны кругового движения (области *A*, *B* на рис. 2). После того, как агент переместится к одной из зон выезда с кругового движения (области *C*, *D* на рис. 2), его состояние автоматически изменится на состояние "выезд с круга". В случае благоприятного выезда из последней зоны агент переходит в конечное состояние, которое учитывается при оценке трафика выходного потока.

При этом на всех вышеописанных этапах (кроме конечного) агент может перейти в аварийное состояние с соответствующим прекращением движения в случае непосредственного контакта с каким-либо другим агентом либо вытеснения

за зону кругового движения (например, из-за эффекта "турбулентности").

На рис. 3 представлены диаграммы состояний, разработанные ОТС и БТС, реализованные в *AnyLogic*.

Основным отличием системы принятия решений БТС от ОТС (рис. 3) является наличие механизма периодической отправки сообщений об аварийной ситуации (ДТП с участием БТС), если данный агент находится в аварийном состоянии. При этом с заданной интенсивностью передаются данные о точном местоположении соответствующего агента всем другим БТС (по имеющимся каналам связи). Данная информация используется другими агентами для уменьшения риска столкновения с БТС, находящимся в аварийном состоянии, в основном, за счет заблаговременной корректировки маршрута и снижения скорости. Другим важным отличием является поддержка непрерывного анализа дорожной ситуации и отправка сообщений другим БТС в случае, если в зоне прямой видимости данного агента наблюдается ДТП с участием ОТС, либо какая-либо иная экстремальная ситуация (например, "дорожный затор"). При этом остальные БТС используют данную информацию для корректировки наиболее важных собственных характеристик, например средней скорости, при прохождении соответствующей зоны (приблизительного места возникновения ДТП).

Для реализации пространственного перемещения агентов используется дискретно-событийный подход, позволяющий обеспечить выполнение вычислительной процедуры определения новых координат для каждого агента с учетом их множественных взаимодействий

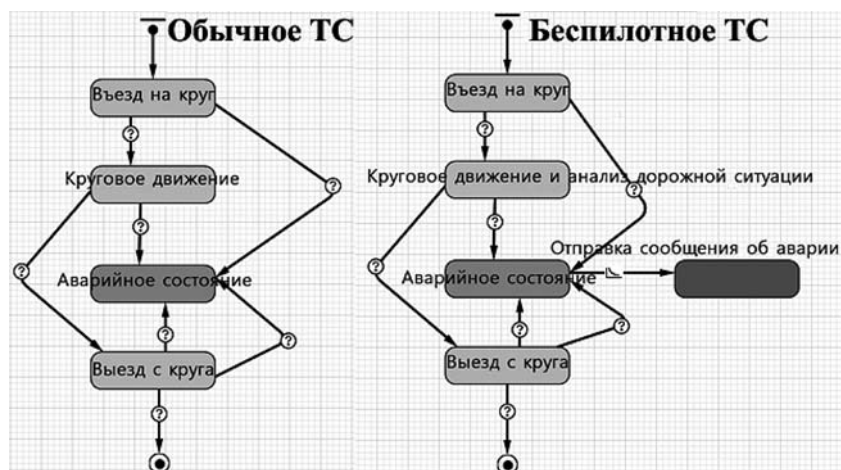


Рис. 3. Диаграммы (карты) состояний обычного и беспилотного ТС

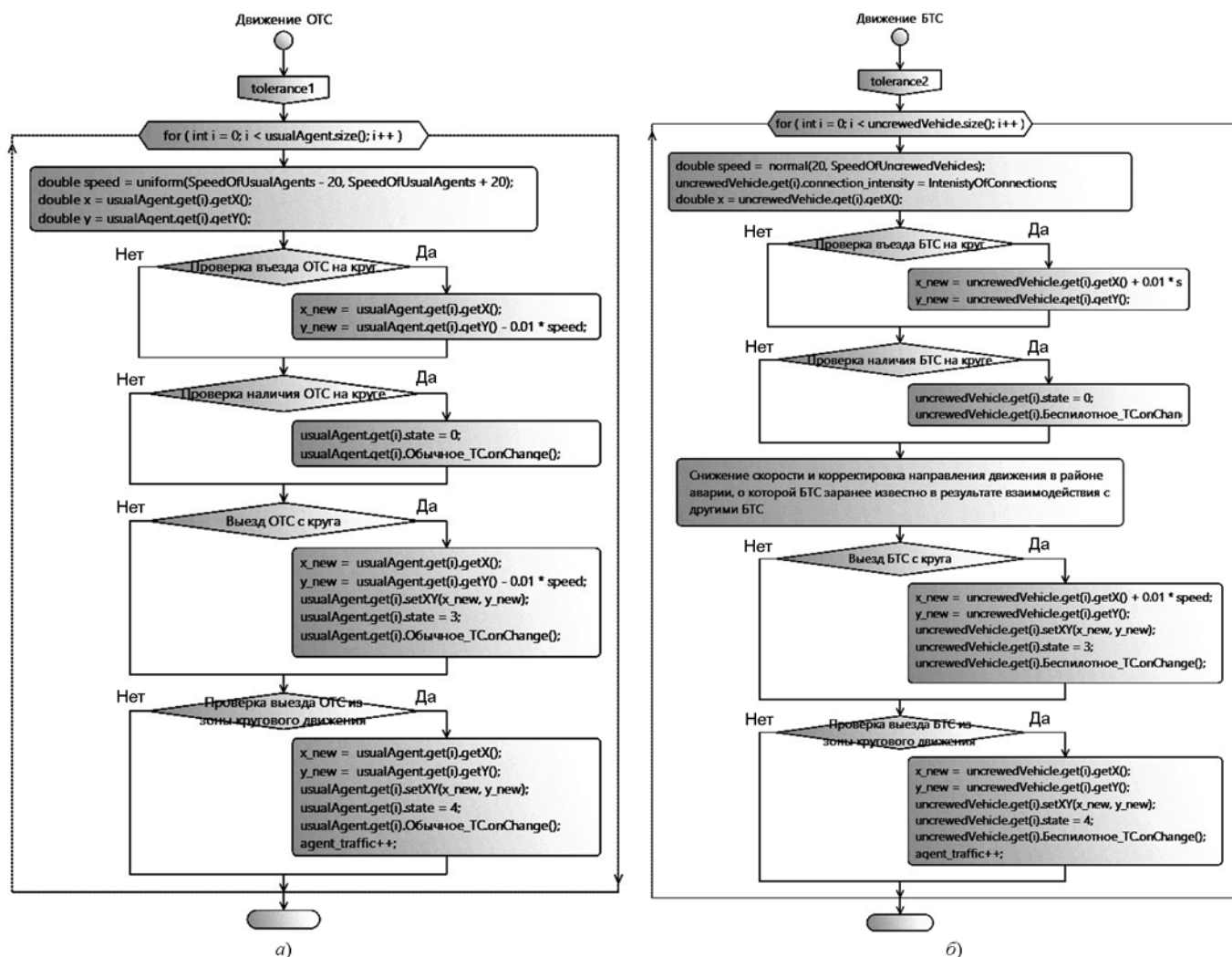


Рис. 4. Фрагмент вычислительной процедуры определения новых координат для агента ОТС (а) и для агента БТС (б) в AnyLogic

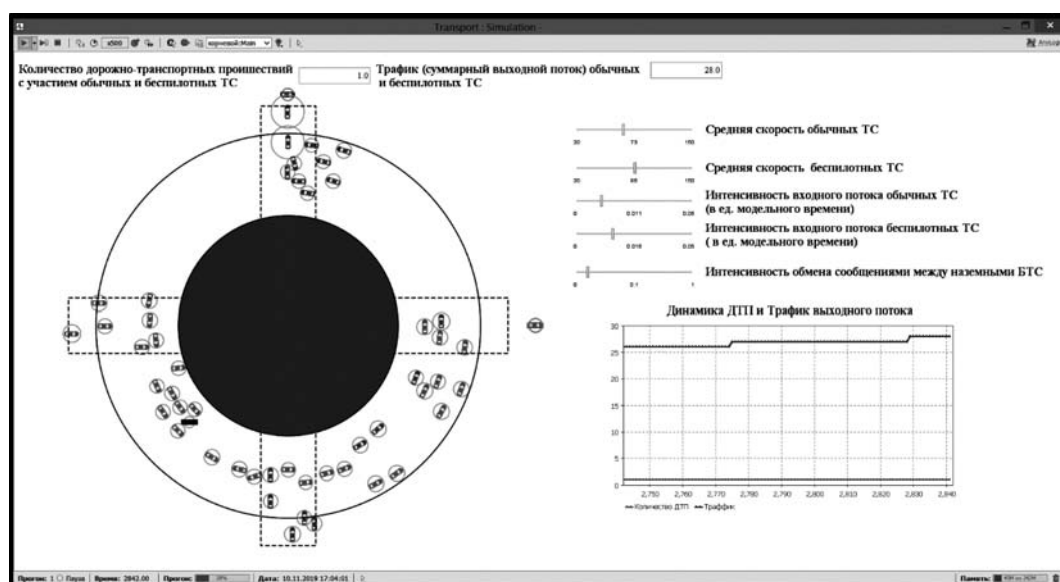


Рис. 5. Панель управления моделью в AnyLogic

(рис. 4, а,б), реализованной в AnyLogicна языке программирования Java.

Отметим, что в рамках предлагаемого подхода в разработанной системе управления наземными БТС были определены следующие основные управляющие параметры:

- средняя скорость ОТС;
- средняя скорость БТС;
- интенсивность входного потока ОТС;
- интенсивность входного потока БТС;
- интенсивность обмена сообщениями между наземными БТС.

Панель управления моделью движения ОТС и БТС представлена на рис. 5.

На рис. 5 видно, что спроектированная система позволяет варьировать значения различных управляющих параметров, оценивать динамику ДТП и трафик выходного потока, а также исследовать эффекты "турбулентности" и "давки" (дорожные заторы), возникающие в условиях высокой плотности транспортных потоков, которые, в свою очередь, зависят от скорости транспортных средств, интенсивностей входных потоков и геометрии пространства дорожного движения.

Далее будут представлены некоторые результаты численных экспериментов с моделью, нацеленные на выявление устойчивых режимов, обеспечивающих безопасный и скоростной трафик.

2. Результаты численных экспериментов

Для моделирования потока ОТС и БТС были использованы некоторые допущения, касающиеся конфигурации пространства дорожного движения и начальных значений основных характеристик агентов. Значения соответствующих параметров модели представлены в табл. 1. Отметим, что характеристики геометрии пространства размещения агентов подобраны таким образом, чтобы обеспечить возникновение множественных ДТП в условиях интенсивного и скоростного дорожного движения ТС.

Далее были исследованы следующие сценарии поведения системы:

- **Сценарий 1. Малоинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии используются базовые значения характеристик агентов, представленные в табл. 1.
- **Сценарий 2. Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии используются базовые значения

Таблица 1

Перечень основных параметров модели и допущений

№	Параметры модели	Значение
Геометрия пространства размещения агентов (в пикселах)		
1	Внутренний радиус зоны кругового движения	200
2	Внешний радиус зоны кругового движения	350
3	Длина съездов и заездов на зону кругового движения	50
4	Ширина съездов и заездов на зону кругового движения	50
Основные характеристики агентов		
5	Исходное число ОТС и БТС, расположенных в зоне кругового движения	10/10
6	Начальная скорость ОТС и БТС (uniform — равномерное распределение, normal — нормальное распределение), км/ч	uniform (40, 80)/normal (20, 60)
7	Начальный радиус личного пространства ОТС и БТС (в пикселах)	20/20
8	Максимальный радиус личного пространства ОТС и БТС в условиях паники и возникновении эффекта "турбулентности"	30/20
9	Размеры проекции агента (ширина и высота, в пикселах)	30 × 10
10	Интенсивность создания агентов (ОТС и БТС), агентов в мин.	0,001
11	Интенсивность обмена сообщениями между БТС, число сообщений в мин.	0,1
12	Соотношение масштабов λ реального и виртуального модельного времени	0,01
13	Коэффициенты c_1, c_2 "отскока" агентов друг от друга при нарушении личного пространства или контакте с аварийными БТС соответственно	100
14	Пороговые расстояния $\hat{R}, \tilde{R}$ для принятия решений о корректировке маршрута и торможении со стороны БТС	100/50
15	Коэффициент ϖ , определяющий уровень снижения средней скорости БТС, при условии нахождения в районе ДТП	0,1

характеристик агентов, представленные в табл. 1, за исключением параметров интенсивности их создания, которые выбираются на уровне 0,01 (как для ОТС, так и БТС).

- **Сценарий 3. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС.** При данном сценарии интенсивности создания агентов выбираются на уровне 0,05 и начальные скорости движения агентов: 150 км/ч.
- **Сценарий 4. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС с неработающими каналами связи.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием коммуникаций

Таблица 2

Результаты имитационного моделирования

Сценарий	Совокупный трафик (число агентов выходного потока)	Число ДТП (число агентов в аварийном состоянии)
Сценарий 1. Малоинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС	40	0
Сценарий 2. Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС	185	0
Сценарий 3. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС	360	460
Сценарий 4. Интенсивный и высокоскоростной поток ОТС и БТС с неработающими каналами связи	297	673
Сценарий 5. Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке	424	18
Сценарий 6. Использование только ОТС в интенсивном и высокоскоростном потоке	339	93

между БТС (интенсивность обмена сообщения между БТС равна 0).

- **Сценарий 5. Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием ОТС и высокой интенсивностью обмена сообщениями между БТС (примерно 1 сообщение в минуту).
- **Сценарий 6. Использование только ОТС в интенсивном и высокоскоростном потоке.** Данный сценарий отличается от Сценария 3 отсутствием БТС.

Результаты имитационного моделирования в виде усредненных значений исследуемых характеристик, полученных в результате множественных (не менее 100) экспериментов, для каждого рассматриваемого сценария при $|T| = 10\ 000$ представлены в табл. 2.

В табл. 2, выделены наиболее важные сценарии, в частности, **Сценарий 2** "Среднеинтенсивный и среднескоростной поток ОТС и БТС" и **Сценарий 5** "Использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке". В первом случае обеспечивается гарантированно безопасный и достаточно скоростной режим функционирования БТС в общем (смешанном) потоке транспортных средств. Во втором случае (использование только БТС в интенсивном и высокоскоростном потоке) возможно дости-

жение принципиального снижения числа ДТП и увеличения трафика по сравнению с другими сценариями, предполагающими экстремальные характеристики системы дорожного движения. Однако подобный эффект достигим только при условии бесперебойной работы каналов связи, действующих между БТС.

Заключение

В данной статье представлен новый подход к разработке систем управления наземными БТС, основанный на использовании методов агентного моделирования.

Разработана новая модель движения ансамбля ОТС и БТС, обеспечивающая реализацию правил поведения и взаимодействия соответствующих агентов на индивидуальном уровне (см. рис. 2). Особенностью данной модели является использование дифференциальных уравнений с переменной структурой для моделирования пространственной динамики ОТС и БТС. Подобная модель позволяет исследовать эффекты "турбулентности" и "давки" (дорожных заторов), в частности возникающие в условиях плотного дорожного потока.

Выполнена программная реализация предложенной модели движения наземных ОТС и БТС в системе *AnyLogic*, поддерживающей методы агентного имитационного моделирования. Для реализации правил перехода к различным состояниям ОТС и БТС используются специальные возможности *AnyLogic*, относящиеся к применению карт состояний агентов (см. рис. 3). Для обеспечения пространственной динамики ТС использовался дискретно-событийный подход с реализацией соответствующей вычислительной процедуры, написанной на языке программирования Java (рис. 4).

Исследованы различные сценарии поведения разработанной системы управления наземными БТС, в частности подтверждающие основные преимущества использования БТС и относящиеся в основном к обеспечению безопасного и скоростного потока ТС, но только в условиях бесперебойной работы каналов связи (табл. 2).

Список литературы

1. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic // *Nature*. 2000. N. 407. P. 487–490.
2. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics // *Physical review E*. 1995. Vol. 51, N. 5. P. 4282–4286.
3. Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study // *Physical review E*. 2007. Vol. 75, N. 4. P. 0461091–0461097.

4. Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z. Crowd turbulence: The physics of crowd disasters, in: The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics (ICNM-V), Shanghai, 2007. P. 967–969.
5. Treiber M., Helbing D. An Adaptive Smoothing Method for Traffic State Identification from Incomplete // Interface and Transport Dynamics: Computational Modelling. 2003. Vol. 32. P. 343–360.
6. Kerner B. S. Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow // Physical Review Letters. 1998. Vol. 81, N. 17. P. 3797–3800.
7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts // Transportation Research Part B: Methodological. 2010. Vol. 44, N. 8–9. P. 983–1000.
8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication // IEEE Transactions on Intelligent Transportation System. 2010. Vol. 11, N. 1. P. 172–181.
9. Цветков В. Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. 2013. Т. 11, № 5 (49). С. 6–9.

10. Михеева Т. И., Михеев С. В., Головин О. К., Сапрыкин О. Н. Паттерны проектирования сложноорганизованных систем. Самара, Интелтранс. 2015. 216 с.
11. Akopov A. S., Beklaryan L. A. An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies // Automation and Remote Control. 2015. Vol. 76, N. 10. P. 1817–1827.
12. Akopov A. S., Beklaryan L. A. Simulation of human crowd behavior in extreme situations // International Journal of Pure and Applied Mathematics. 2012. Vol. 79, N. 1. P. 121–138.
13. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior // Transportation Research Part B. 2006. Vol. 40, N. 8. P. 667–687.
14. Beklaryan A. L., Akopov A. S. Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering, in Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016. P. 1275–1276.

A. S. Akopov^{1,2}, Professor, e-mail: aakopov@hse.ru, L. A. Beklaryan², Professor, e-mail: beklar@cemi.rssi.ru, N. K. Khachatryan^{1,2}, Associate Professor, e-mail: nerses@cemi.rssi.ru, nkachatryan@hse.ru,

A. L. Beklaryan¹, Associate Professor, e-mail: abeklaryan@hse.ru,
E. V. Kuznetsova¹, Associate Professor, e-mail: ev.kuznetsova@hse.ru

¹National Research University Higher School of Economics, Moscow

²Central Economics and Mathematics Institute RAS, Moscow,

Multi-Agent Control System for Unmanned Ground Vehicles

This article presents a ground-based unmanned vehicles (UV) control system developed using agent-based simulation methods (supported by AnyLogic). An important feature of such a system is the ability to assess the influence of various parameters (such as average initial speeds, input stream intensities, frequency of data exchange between BTS agents, etc.) on the behavior and condition of unmanned and conventional vehicles in a dense stream. The effects of "turbulence" and "traffic congestion", caused usually by a high density of vehicles and the occurrence of road traffic accidents, are investigated. The software implementation of the developed simulation model in the AnyLogic IDE was performed and numerical experiments were carried out. The modes are found that ensure safe and high-speed movement of vehicles in a dense stream.

Keywords: multi-agent system, unmanned transport systems, intelligent transportation system, AnyLogic

Acknowledgements: Thereported study was funded by RFBR, project number 19-29-06003.

DOI: 10.17587/it.26.342-353

References

1. Helbing D., Farkas I., Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*, 2000, no. 407, pp. 487–490.
2. Helbing D., Molnar P. Social force model for pedestrian dynamics, *Physical review E*, 1995, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286.
3. Helbing D., Johansson A. Al-Abideen H. Z. Dynamics of crowd disasters: An empirical study, *Physical review E*, 2007, vol. 75, no. 4, pp. 0461091–0461097.
4. Helbing D., Johansson A., Al-Abideen H. Z. Crowd turbulence: The physics of crowd disasters, *The Fifth International Conference on Nonlinear Mechanics (ICNM-V)*, Shanghai, 2007, pp. 967–969.
5. Treiber M., Helbing D. An Adaptive Smoothing Method for Traffic State Identification from Incomplete, *Interface and Transport Dynamics: Computational Modelling*, 2003, vol. 32, pp. 343–360.
6. Kerner B. S. Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow, *Physical Review Letters*, 1998, vol. 81, no. 17, pp. 3797–3800.
7. Treiber M., Kesting A., Helbing D. Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized facts, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2010, vol. 44, no. 8–9, pp. 983–1000.

8. Kesting A., Treiber M., Helbing D. Connectivity Statistics of Store-and-Forward Intervehicle Communication, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2010, vol. 11, no. 1, pp. 172–181.
9. Cvetkov V. Ja. Integral'noe upravlenie vysokoskorostnoj magistral'ju, *Mir Transporta*, 2013, vol. 11, no. 5 (49), pp. 6–9 (in Russian).
10. Miheeva T. I., Miheev S. V., Golovnin O. K., Saprykin O. N. Patterny proektirovaniya slozhnoorganizovannyh system, Samara, Inteltrans, 2015, 216 p. (in Russian).
11. Akopov A. S., Beklaryan L. A. An Agent Model of Crowd Behavior in Emergencies, *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76, no. 10, pp. 1817–1827.
12. Akopov A. S., Beklaryan L. A. Simulation of human crowd behavior in extreme situations, *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2012, vol. 79, N. 1, pp. 121–138.
13. Antonini G., Bierlaire M., Weber M. Discrete choice models of pedestrian walking behavior, *Transportation Research Part B*, 2006, vol. 40, no. 8, pp. 667–687.
14. Beklaryan A. L., Akopov A. S. Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering, *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2016, pp. 1275–1276.

О. Н. Крахмалев, канд. техн. наук, доц., olegkr64@mail.ru,
Брянский государственный технический университет

Алгоритмизация параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов

Предложен способ алгоритмизации параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов, полученной методом Лагранжа—Эйлера. Алгоритм строится на основе объектно-ориентированного подхода методом декомпозиции. При этом в структуре динамической модели выделяются основообразующие составные части. В качестве таких частей динамической модели выделены геометрическая и инерционная модели манипуляционных систем. Использование языка объектно-ориентированного программирования позволяет описать классы, соответствующие структурам геометрической и инерционной моделей. На основе созданных классов могут быть инициализированы объекты. Из объектов путем соединения их в различных комбинациях с указанием допустимых операций над ними могут быть получены объектные схемы. Исходная динамическая модель рассматривается как инструкция для сборки соответствующей ей объектной схемы. Алгоритмизация параллельных вычислений основывается на независимости вычисления объектов данных классов.

Ключевые слова: роботы, манипуляционные системы, динамические модели, математическое моделирование, объектно-ориентированный подход, вычислительные алгоритмы, параллельные вычисления

Введение

При моделировании манипуляционных систем роботов разработка алгоритмов, реализующих параллельные вычисления соответствующих математических моделей, представляет собой актуальную задачу. Известны примеры разработок таких алгоритмов [1–5], однако исследование данного вопроса нельзя считать завершенным.

Рассматриваемые в статье методы объектно-ориентированного моделирования манипуляционных систем роботов позволяют повысить эффективность выполнения работ, связанных с составлением параллельных вычислительных алгоритмов. Это достигается на основе представления математических моделей в виде объектных схем, в которых каждый объект рассматривается как часть математической модели, независимая от других частей-объектов, связанных с ним в общую схему.

Динамическая модель манипуляционных систем роботов, полученная на основе метода Лагранжа — Эйлера, имеет вид

$$[M_s]\{\ddot{q}\} + \{\dot{q}\}^T[C_s]\{\dot{q}\} = Q_s, s = 1, \dots, n, \quad (1)$$

здесь $\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$, $\{\dot{q}\} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n]^T$, $\{\ddot{q}\} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n]^T$ — векторы обобщенных ко-

ординат и их производных по времени; Q_s — обобщенная сила по s -й обобщенной координате; n — число степеней свободы манипуляционной системы; $[M_s]$ — $(1 \times n)$ -мерная матрица-строка инерционных характеристик

$$[M_s(q)] = \sum_{k=1}^{(1 \times n)} [m_j^{sk}],$$
$$m_j^{sk} = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_s} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_j} \right), j = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$[C_s]$ — $(n \times n)$ -мерная матрица центробежных и кориолисовых эффектов

$$[C_s(q)] = \sum_{k=1}^{(n \times n)} [c_{ij}^{sk}],$$
$$c_{ij}^{sk} = \text{tr} \left(\frac{\partial A_{0,k}}{\partial q_s} H_k \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_i \partial q_j} \right), i, j = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где tr — операция вычисления суммы диагональных элементов матрицы, H_k — (4×4) -мерная матрица инерции k -го звена манипуляционной системы, рассматриваемого как твердое тело. $A_{0,k}$ — (4×4) -мерная матрица преобразования однородных координат из системы координат, связанной с k -м звеном, в не-

подвижную систему координат, связанную с основанием робота;

$$Q_s = Q_{Ds} + Q_{Gs} + Q_{Fs}, \quad (4)$$

где Q_{Ds} — усилие, развиваемое приводом в s -м сочленении (шарнире); Q_{Gs} — обобщенная сила по s -й обобщенной координате, соответствующая действию сил тяжести; Q_{Fs} — обобщенная сила по s -й обобщенной координате, соответствующая действию внешних сил:

$$Q_{Gs} = \sum_{k=s}^n \text{tr} \left[F_{Gk} \frac{\partial A^T}{\partial q_s} \right], \quad (5)$$

где F_{Gk} — (4×4) -мерная матрица, содержащая силы тяжести k -го звена [6],

$$Q_{Fs} = \sum_{k=s}^n \text{tr} \left(F_{Rk} \frac{\partial A_{0,k}^T}{\partial q_s} + F_{Mk,s} A_{0,s}^T \right), \quad (6)$$

где F_{Rk} и $F_{Mk,s}$ — (4×4) -мерные матрицы, соответственно содержащие проекции главного вектора и главного момента внешних сил [6].

Объектная схема данной динамической модели может быть представлена в виде, показанном на рис. 1 [7]. Объекты, соответствующие матрицам и векторам, изображены на этой схеме прямоугольниками, скалярные величины — треугольниками, а арифметические операции — соответствующими им знаками.

На представленной объектной схеме Q_s — объект, соответствующий результирующей обобщенной силе по s -й обобщенной (шарнирной) координате; Q_{Ds} — объект, соответствующий усилию, развиваемому приводом в s -м сочленении (шарнире); Q_{Gs} — объект, соответствующий обобщенной силе Q_{Gs} ; Q_{Fs} — объект, соответствующий обобщенной силе Q_{Fs} . M_s — объект класса *Dynamic_matrix_Ms*, соответствующий матрице-строке $[M_s]$; C_s — объект класса *Dynamic_matrix-Cs*, соответствующий матрице $[C_s]$. DDq — объект класса *Generalized_accelerations*, Dq и Dq^T — объекты класса *Generalize_speeds*, моделирующие векторы $\{\ddot{q}\}$, $\{\dot{q}\}$ и $\{\dot{q}\}^T$ соответственно.

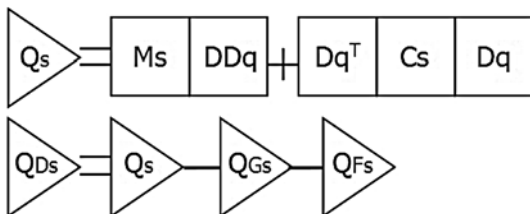


Рис. 1. Объектная схема динамической модели манипуляционных систем роботов

Структуры введенных классов могут быть созданы с использованием языков объектно-ориентированного программирования, например C++, и должны описывать объекты в соответствии с выражениями (1)–(6).

1. Алгоритмизация вычислений динамической модели

В вычислительном алгоритме, реализующем моделирование на основе объектной схемы (рис. 1), можно выделить несколько уровней (ярусов), на которых происходят вычисления составных частей данной объектной схемы.

На первом (I) уровне вычисляются объекты, соответствующие матрицам инерции звеньев H_k , составляющие так называемую инерционную модель манипуляционных систем (рис. 2).

На втором (II) уровне вычисляются объекты, соответствующие матрицам преобразования однородных координат $A_{0,k}$ и их частным производным, относящиеся к геометрической модели манипуляционных систем (рис. 3).

Объекты, вычисляемые на втором (II) уровне, зависят от изменяющихся в процессе моделирования параметров, кроме того, при вычислении матриц частных производных необходимо исключить вычисление элементов этих матриц, тождественно равных нулю. В соответствии с этим число N_1 вычисляемых матриц частных производных $\partial A_{0,k} / \partial q_s$ ($k, s = 1, \dots, n$) будет определяться выражением

$$N_1 = \frac{n}{2}(n+1), \quad (7)$$

а число N_2 матриц вторых производных ($\partial^2 A_{0,k} / \partial q_s^2$ и $\partial^2 A_{0,k} / (\partial q_i \partial q_j)$) — выражением

$$N_2 = \sum_{k=1}^n \frac{k}{2}(k+1). \quad (8)$$



Рис. 2. Уровень I алгоритма



Рис. 3. Уровень II алгоритма

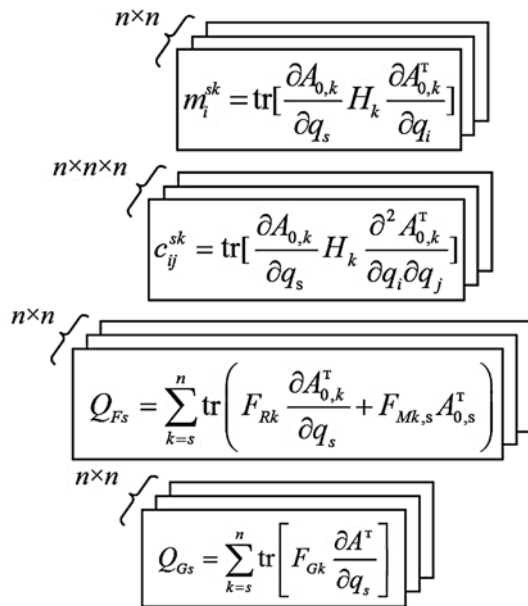


Рис. 4. Уровень III алгоритма

На третьем (III) уровне выполняются вычисления на основе объектных схем, соответствующих различным элементам матриц $[M_s]$ и $[C_s]$, выполняемые на основе выражений (2) и (3), и соответствующих скалярным величинам Q_{Gs} и Q_{Fs} , выполняемые на основе выражений (5) и (6) (рис. 4).

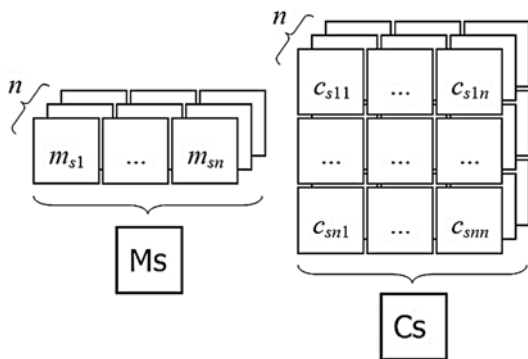


Рис. 5. Объектное представление матриц $[M_s]$ и $[C_s]$

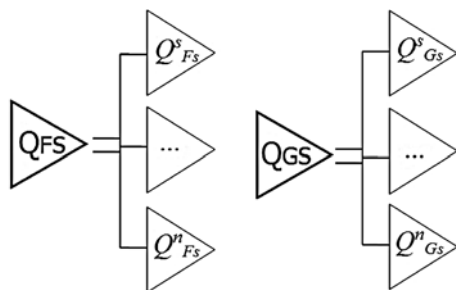


Рис. 6. Объектное представление обобщенных сил

На четвертом (IV) уровне на основе объектов M_s , C_s , QGs и QFs , соответствующих матрицам $[M_s]$ и $[C_s]$ (рис. 5) и обобщенным силам Q_{Gs} и Q_{Fs} (рис. 6), выполняется вычисление объектной схемы динамической модели (1) (см. рис. 1).

Иерархическая структура алгоритма параллельных вычислений в динамической модели (1), разбитого на несколько уровней и соответствующего объектной схеме (см. рис. 1), без моделирования внешней нагрузки может быть проиллюстрирована на общей вычислительной схеме (рис. 7).

Вычисляемая на первом уровне алгоритма инерционная модель отражает распределение масс внутри звеньев исследуемой манипуляционной системы, соответствующая ей математическая модель представляет собой множество матриц инерции звеньев H_k ($k = 1, \dots, n$).

На втором уровне формируется геометрическая модель манипуляционной системы. Ее математическая модель представляет собой множество матриц преобразования однородных координат $A_{0,k}$ ($k = 1, \dots, n$), дополненное множеством частных производных от этих матриц.

Определение этих двух подмоделей в структуре динамической модели манипуляционных систем роботов имеет важное методологическое значение, так как позволяет в структуре

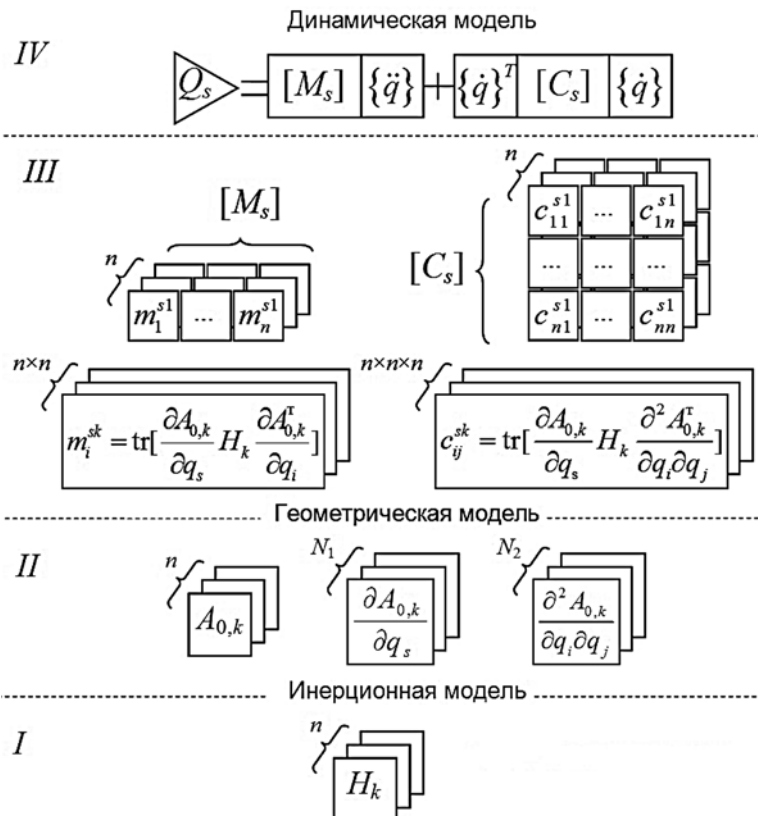


Рис. 7. Уровни алгоритма параллельных вычислений динамической модели

данных и алгоритмов динамической модели выделить части, имеющие определенный прикладной смысл, вычисление которых может выполняться независимо друг от друга.

Дальнейшее распараллеливание вычислений, выполняемых на соответствующих уровнях рассмотренного алгоритма параллельных вычислений в динамической модели манипуляционных систем роботов, может быть выполнено на основе алгоритмов параллельных вычислений матричных операций.

2. Алгоритмы параллельных вычислений матричных операций

Рассмотрим граф вычислительного процесса произведения матрицы размерности (4×4) на вектор размерности (4×1) (рис. 8), основывающийся на соотношении

$$w_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij}v_j, i = \{1, \dots, 4\}. \quad (9)$$

При вычислении произведения матрицы размерности $n \times n$ на соответствующий вектор число необходимых скалярных операций сложения и умножения может быть оценено величиной

$$T_1 = 2n^2. \quad (10)$$

Анализ графа вычислительного процесса (рис. 8) показывает, что параллельные способы решения задачи произведения матрицы на вектор могут быть получены на основе использования параллельных алгоритмов суммирования, в данном случае использован каскадный алгоритм суммирования. Кроме того, способ организации параллельных вычислений будет зависеть от числа доступных для использования процессоров.

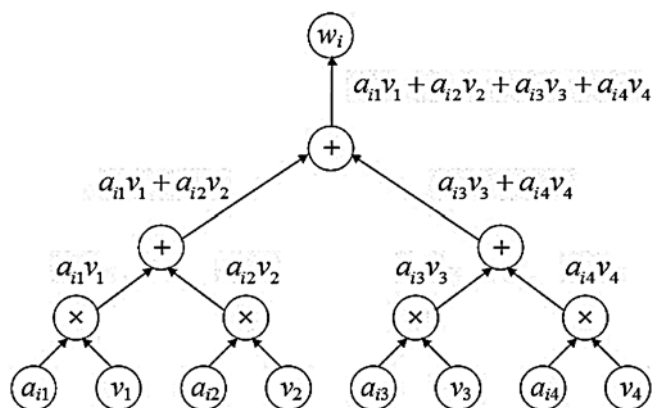


Рис. 8. Граф вычислительного процесса произведения (4×4) -мерной матрицы на (4×1) -мерный вектор

Нужно отметить, что последовательности выполняемых операций умножения отдельных n строк матрицы на вектор являются независимыми и могут быть выполнены параллельно. Операции умножения каждой строки на вектор включают n независимых операций поэлементного умножения и тоже могут быть выполнены параллельно. Таким образом, максимально необходимое число процессоров определяется величиной

$$p = n^2. \quad (11)$$

Время выполнения параллельного алгоритма, отнесенное ко времени выполнения одной скалярной операции, при использовании p процессоров определяется временем выполнения операции умножения и временем выполнения каскадного алгоритма суммирования [8]

$$T_p = 1 + \log_2 n. \quad (12)$$

Показатели эффективности параллельного алгоритма определяется выражением

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} = \frac{2n^2}{1 + \log_2 n}, \quad (13)$$

где S_p — ускорение для p процессоров, получаемое при использовании параллельного алгоритма, и

$$E_p = \frac{S_p}{p} = \frac{2}{1 + \log_2 n}, \quad (14)$$

где E_p — эффективность использования процессоров.

Информационный граф (рис. 8), соответствующий вычислительному процессу умножения i -й строки (4×4) -мерной матрицы на (4×1) -мерный вектор, построенный на основе четырех процессоров, представлен на рис. 9.

Задача умножения прямоугольных матриц определяется соотношением

$$c_{ij} = \sum_{l=1}^k a_{il}b_{lj}, i = \{1, \dots, n\}, j = \{1, \dots, m\}. \quad (15)$$

В случае умножения квадратных матриц размерности $n \times n$ число скалярных операций умножения и сложения пропорционально n^3 , а для их оценки может быть использована величина

$$T_1 = 2n^3. \quad (16)$$

Последовательности выполняемых операций умножения отдельных строк первой матрицы на соответствующий столбец вто-

рой матрицы являются независимыми и могут быть выполнены параллельно. Алгоритм параллельного вычисления при умножении матриц может быть построен на основе рассмотренного вычислительного алгоритма умножения матрицы на вектор. Соответственно, необходимое число процессоров для максимального распараллеливания вычислительного алгоритма будет определяться величиной

$$p = n^3. \quad (17)$$

Информационный граф, соответствующий вычислительному процессу умножения (4×4) -мерных матриц, построенный на основе 64 процессоров, представлен на рис. 10.

Время выполнения параллельного алгоритма, как и прежде, будет определяться выраже-

нием (12). Получаемое ускорение для p процессоров повысится:

$$S_p = \frac{T_1}{T_p} = \frac{2n^3}{1 + \log_2 n}, \quad (18)$$

а эффективность использования процессоров в соответствии с (14) не изменится.

Снижение числа используемых процессоров потребует перестройки информационного графа (рис. 10), отражающего вычислительный процесс умножения матриц. Это повлечет увеличение времени выполнения вычислений.

Заключение

Рассмотренный в статье алгоритм параллельных вычислений динамической модели (1) имеет четыре уровня распараллеливания (см. рис. 7) и может быть дополнен начальным (нулевым) уровнем, соответствующим инициализации данных.

Число независимо вычисляемых операций на уровне III максимально. На этом уровне при уменьшении числа используемых процессоров будет наблюдаться наибольшее замедление.

На уровне IV информационный граф вычислительного процесса умножения $(n \times n)$ -мерной матрицы на $(n \times 1)$ -мерный вектор для динамической модели (1) должен строиться на основе n процессоров, по аналогии с информационным графом, построенным на основе четырех процессоров (см. рис. 9).

Рассмотренный алгоритм параллельных вычислений в динамической модели (1) манипуляционных систем роботов может быть реализован на основе объектно-ориентированного подхода с использованием объектных схем. Такие объектные схемы строятся из объектов, соответствующих геометрической и инерционной моделям исследуемой манипуляционной системы, а также из объектов, соответствующих модели внешней нагрузки.

Применение параллельных вычислительных алгоритмов в задачах моделирования требует от вычислительных систем наличия достаточного числа процессоров. Это требование может быть реализовано на основе многокристальных реконфигурируемых вычислительных систем, созданных на основе применения программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Такие вычислительные системы могут адаптироваться под структуру решаемой задачи и обеспечить реализацию сложных многоуровневых параллельных алгоритмов [9, 10].

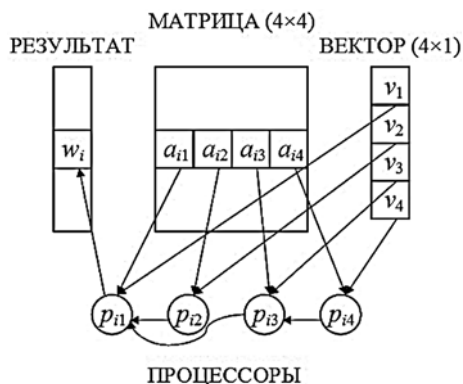


Рис. 9. Информационный граф вычислительного процесса произведения i -й строки (4×4) -мерной матрицы на (4×1) -мерный вектор

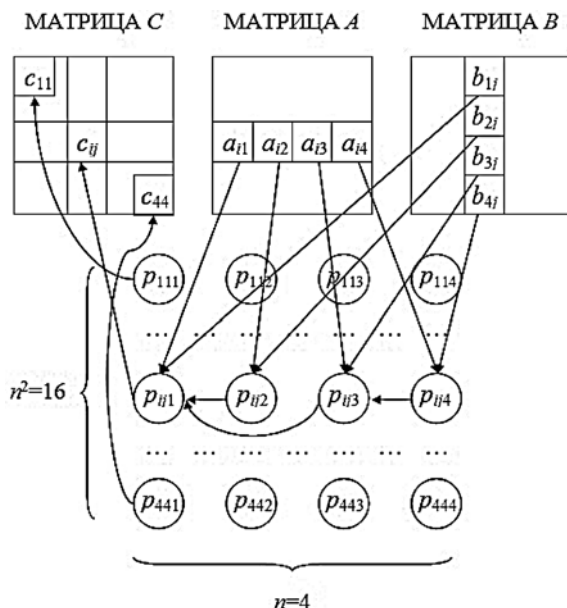


Рис. 10. Информационный граф вычислительного процесса умножения (4×4) -мерных матриц на основе 64 процессоров

Список литературы

1. Белоусов И. Р. Применение метода символьных преобразований для формирования алгоритма параллельных вычислений в задачах кинематики и динамики роботов // Отчет ИПМ им. М. В. Келдыша РАН № 5-19-93. 1993. 25 с.
2. Второв В. Б., Иншаков Д. Ю. Моделирование динамики робота-манипулятора на параллельных вычислительных структурах // Известия ТЭТУ. 1997. № 513. С. 65–70.
3. Малашонок Г. И., Аветисян А. И., Валеев Ю. Д., Зуев М. С. Параллельные алгоритмы компьютерной алгебры // Труды ИСП РАН. 2004. № 2. Т. 8. С. 169–180.
4. Внуков А. А., Лисенков М. А. Параллельный алгоритм обработки данных на примере решения основных задач динамики роботов-манипуляторов // Доклады пятой международной конференции "Параллельные вычисления и задачи управления", Москва. 2010. С. 1025–1036.
5. Внуков А. А., Лисенков М. А. Разработка алгоритмов параллельной обработки данных в многопроцессорных

системах на примере решения задач динамики промышленных роботов // Вестник РУДН серия Инженерные исследования. 2010. № 4. С. 60–72.

6. Крахмалев О. Н. Моделирование манипуляционных систем роботов: Учеб. пособ. Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. 165 с.

7. Крахмалев О. Н. Объектно-ориентированное моделирование манипуляционных систем роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 4(21). С. 41–47.

8. Гергель В. П., Стронгин Р. Г. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем: учебное пособие. Н. Новгород: ННГУ, 2003. 184 с.

9. Каляев И. А., Дордопуло А. И., Левин И. И., Федоров А. М. Развитие отечественных многокристалльных reconfigurable multipipeline computing structures: от воздушного к жидкостному охлаждению // Труды СПИИРАН. 2017. № 1 (50). С. 5–31.

10. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A., Shmoilov V. I. Reconfigurable multipipeline computing structures // New York: Nova Science Publishers. 2012. 330 p.

O. N. Krakhmalev, Ph.D., Associate Professor, olegkr64@mail.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241036, Russian Federation

Algorithmization of Parallel Computing in a Dynamic Model of Robot Manipulation Systems

The task of developing an algorithm for parallel computing in a dynamic model of robot manipulation systems obtained by the Lagrange-Euler method is considered.

The algorithm is built on the basis of the object-oriented approach by the decomposition method. In the structure of the dynamic model highlights the fundamental components. Geometric and inertial models of manipulation systems are defined as such components. Using the language of object-oriented programming, classes are created that describe the structure of the geometric and inertial models. Independent objects can be initialized based on the created classes. By combining objects in various combinations, object schemas can be obtained. The initial dynamic model is considered as an instruction for building the corresponding object schema. Algorithmization of parallel computing is based on the independence of the calculation of data objects of classes. The use of parallel computational algorithms in modeling problems requires a sufficient number of processors to implement such calculations. This requirement can be implemented on the basis of multi-chip reconfigurable computer systems created using programmable logic integrated circuits. Such computing systems can adapt to the structure of the problem to be solved and provide the implementation of complex multi-level parallel algorithms.

Keywords: robots, manipulation systems, dynamic models, mathematical modeling, object-oriented approach, computational algorithms, parallel computing.

DOI: 10.17587/it.26.354-359

References

1. Belousov I. R. The use of the method of symbolic transformations for the formation of parallel computing algorithms in the problems of kinematics and dynamics of robots, *Report of IPM im. M. V. Keldysh RAS*, no. 5-19-93, 1993, 25 p. (in Russian).
2. Vtorov V.B, Inshakov D. Yu. Modeling the dynamics of a robotic arm on parallel computing structures, *Izvestiya TETU*, 1997, no. 513, pp. 65–70 (in Russian).
3. Malashonok G. I., Avetisyan A. I., Valeev Yu. D., Zuev M. S. Parallel Algorithms of Computer Algebra, *Trudy ISP RAN* (Proceedings of ISP RAS), 2004, no. 2, vol. 8, pp. 169–180.
4. Vnukov A. A., Lisenkov M. A. Parallel data processing algorithm by the example of solving the main problems of the dynamics of robotic manipulators, *Reports of the fifth international conference "Parallel Computing and Control Problems"*, Moscow, 2010, pp. 1025–1036 (in Russian).

5. Vnukov A. A., Lisenkov M. A. The development of parallel data processing algorithms in multiprocessor systems using the example of solving the problems of the dynamics of industrial robots, *Bulletin of RUDN University series Engineering Research*, 2010, no. 4, pp. 60–72.
6. Krakhmalev O. N. Modeling of robot manipulation systems: textbook, Saratov, IPR Media, 2018, 165 p. (in Russian).
7. Krakhmalev O. N. Object-oriented modeling of robots' manipulation systems, *Robotics and Technical Cybernetics*, 2018, no. 4 (21), pp. 41–47 (in Russian).
8. Gergel V. P., Strongin R. G. Basics of parallel computing for multiprocessor computing systems: a tutorial, N. Novgorod: NNSU, 2003, 184 p. (in Russian).
9. Kalyaev I. A., Dordopulo A. I., Levin I. I., Fedorov A. M. Development of domestic multi-chip reconfigurable computer systems: from air to liquid cooling, *Proceedings of SPIIRAS*, 2017, no. 1 (50), pp. 5–31 (in Russian).
10. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A., Shmoilov V. I. Reconfigurable multipipeline computing structures, New York, Nova Science Publishers, 2012, 330 p.

И. М. Шилов, аспирант, инженер, e-mail: ilia.shilov@yandex.ru,
Д. А. Заколдаев, канд. техн. наук, доц., e-mail: d.zakoldaev@mail.ru,
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

Многомерный блокчейн и его преимущества

Рассмотрены ключевые недостатки устойчивых распределенных реестров, основанных на технологии блокчейн. В качестве одного из потенциальных способов их устранения предложен новый подход к построению устойчивых распределенных реестров за счет модификации существующих решений — многомерный блокчейн. Проведена численная оценка ключевых характеристик предлагаемого решения: числа транзакций в единицу времени, периода генерации блоков и объема хранимой узлами сети информации. Полученные характеристики сопоставлены с аналогами.

Ключевые слова: блокчейн, устойчивый распределенный реестр, многомерный блокчейн, масштабирование, адресация, транзакции, число транзакций в единицу времени, стойкость, целостность, доступность

Введение

В настоящее время трудно переоценить значение криптографических валют и степень их влияния на развитие информационных технологий и, в частности, на построение децентрализованных систем. Ключевым преимуществом подобных систем является использование механизмов достижения взаимопонимания между отдельными узлами, не доверяющими друг другу и действующими в ненадежной среде [1, 2]. Неоднократно отмечалось, что использование блокчейна не ограничивается средой криптовалют, поскольку данная технология является лишь способом построения децентрализованной системы, а не конкретной реализацией прикладного протокола [3–5].

Развитию технологии и повсеместному применению препятствуют недостатки, среди которых наиболее критичны неограниченный рост объема блокчейна, неэффективные механизмы достижения консенсуса и наличие посредников при межсистемном обмене. Рост объема вследствие затруднения хранения всей базы данных транзакций влечет частичную централизацию, а наличие посредников негативно влияет на доступность системы и конфиденциальность информационных потоков.

Устранение приведенных недостатков явилось одним из основных направлений раз-

вития устойчивых распределенных реестров в последние годы. Математическое доказательство безопасности системы на основе доказательства доли владения открыло путь к замене энергозатратного механизма "доказательство работы" практически не требующим вычислительных ресурсов механизмом "доказательство доли владения" [6–7]. Неконтролируемые транзакции устраняются такими политиками, как KYC (Know Your Customer) и AML (Anti-Money Laundering), что позволяет привести системы на основе распределенных реестров в соответствие законодательству.

Наиболее существенным недостатком является увеличение объема хранимой узлами сети информации. Хотя попытки устранения данной проблемы предпринимаются постоянно, полноценное решение представлено не было. В табл. 1 приведены некоторые характеристики существующих решений. На рис. 1 приведены графики роста объема блокчейна для различных систем на начало 2020 г. Экстраполяция результатов не представляется возможной вследствие зависимости характеристик исследуемых систем от их популярности, что влечет нелинейный характер изменения размеров блокчейнов. Например, для блокчейна Bitcoin график приведен на рис. 2 [8].

Проблема перевода средств между фидуциарными денежными системами и криптова-

Таблица 1

Характеристики различных систем на основе блокчейна в апреле 2020 года

Характеристики	Блокчейн				
	Bitcoin	Ethereum	Bitcoin Cash	Litecoin	Dash
Размер блокчейна, Гб	270,14	667,1	165,09	20,23	8,05
Размер одного блока (средний), Кб	1100	23	646	18	24
Время создания одного блока (среднее)	10 мин	15 с	10 мин	2,5 мин	2,5 мин
Число транзакций в секунду	3,46	8,34	0,22	0,28	0,23

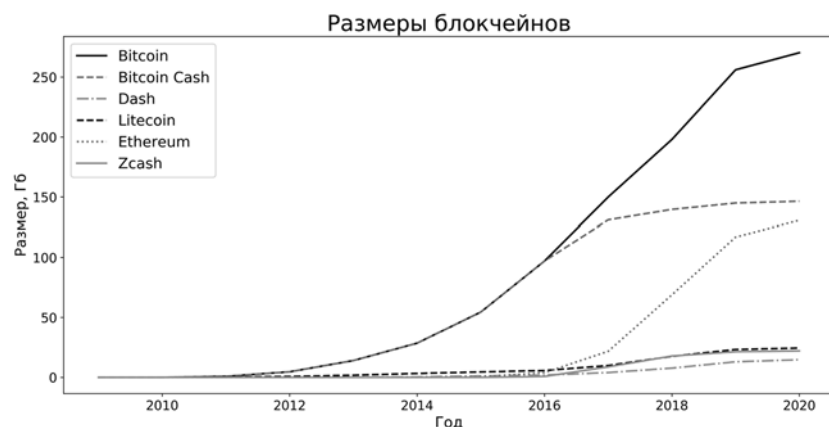


Рис. 1. Зависимость объемов некоторых блокчейнов от времени

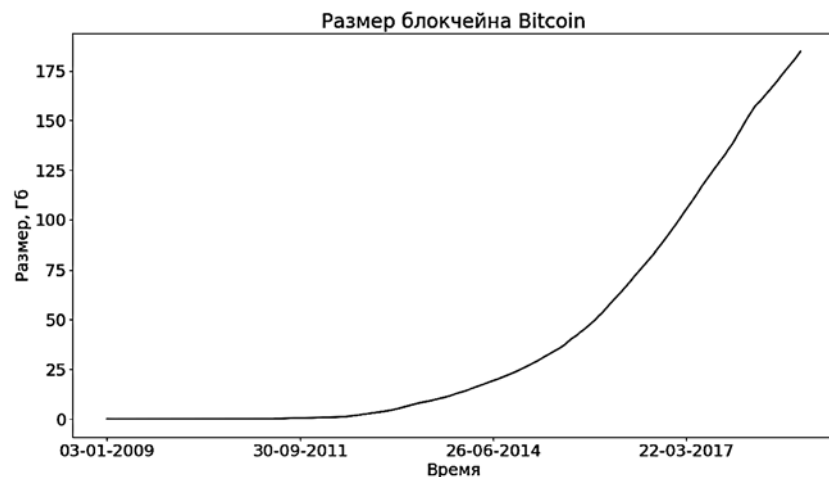


Рис.2. Размер блокчейна Bitcoin

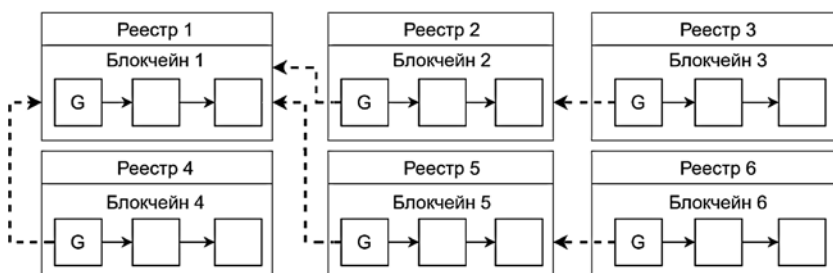


Рис. 3. Многомерный блокчейн

людьми или разными криптовалютами решается с привлечением третьих лиц или с использованием сайдчейнов, которые не представляют собой обобщенный подход и функционируют исключительно как средство обмена между двумя отдельными системами [9].

В работе предложен подход к решению некоторых описанных проблем, призванный снизить негативное влияние на конфиденциальность, целостность и доступность систем, построенных на базе устойчивых распределенных реестров. Предлагаемый подход позволяет реализовать безопасный межсистемный обмен, масштабирование и объединение отдельных систем в надсистему.

Структура многомерного блокчейна

Многомерный блокчейн представляет собой множество блокчейнов, в котором все блокчейны, за исключением первого, проходят процедуру регистрации в одном из существующих блокчейнов. Регистрация подразумевает внесение информации о генезис-блоке (первом блоке нового блокчейна) и базовых свойствах блокчейна в другой блокчейн. Понятие распределенного реестра при этом становится двояким: с одной стороны, многомерный блокчейн реализует распределенный реестр, с другой стороны каждый блокчейн в пределах многомерного блокчейна сам реализует распределенный реестр.

В зависимости от архитектуры возможны два режима функционирования многомерного блокчейна: режим блоков и режим состояний. Обобщенное представление многомерного блокчейна приведено на рис. 3. Каждый блокчейн в пределах многомерного блокчейна реализует распределенный реестр. Это предположение позволяет не затрагивать особенности функционирования отдельного блокчейна [10, 11].

Режим блоков подразумевает использование понятия типа блока. Типом называется набор полей структуры данных и ассоциированных с ней методов. Данная особенность является ключевым отличием решения от сайдчейнов, в которых пользователи одной из систем могут не обладать информацией о заморозке средств для использования в сайдчейне. Многомерный блокчейн в данной модели представляет собой разреженную матрицу, в которой каждый генезис-блок, кроме первого, помещается в существующий блокчейн в виде блока особого типа. Факт регистрации остается прозрачным для нового блокчейна, поскольку в дальнейшем он может функционировать самостоятельно, не прибегая к использованию функциональности многомерного блокчейна.

Основанная на модели функционирования Ethereum модель состояний является более совершенным и перспективным подходом. Ключевым ее преимуществом является принципиальная возможность верификации транзакций на основе информации только из последнего блока, что является следствием использования концепции виртуальных состояний. Также в этой модели реализованы Тьюринг-полные языки программирования, позволяющие осуществлять взаимодействие нескольких участников с применением смарт-контрактов. Состояние многомерного блокчейна определяется совокупностью состояний отдельных его компонентов, причем каждая система самостоятельно осуществляет дискретные переходы между состояниями. Периодичность переходов между состояниями определяется каждым вложенным блокчейном самостоятельно, а пе-

риод перехода многомерного блокчейна равен наибольшему общему делителю всех периодов перехода вложенных блокчейнов.

Адресация в многомерном блокчейне

Наиболее существенным преимуществом многомерного блокчейна является адресация, которая оказывает влияние на принципы построения приложений. Она используется для передачи средств между блокчейнами и формирования логической структуры системы. Адресация осуществляется иерархически и напоминает порядок адресации файлов и директорий в иерархических файловых системах. Форма адресации задается для каждого приложения произвольно. Можно выделить два типа адресации в наиболее общем приближении: абсолютная адресация — относительно первого генезис-блока, и относительная адресация — в пределах текущего блокчейна. При этом также возможны варианты записи адреса — в форме номера (метки) или в форме хэш-суммы. В режиме блоков и режиме машины состояний адресация работает по-разному.

В режиме блоков дочерние блокчейны адресуются номерами блоков, в которых осуществлена регистрация, и их хэш-суммами. Подход с использованием хэш-сумм предпочтителен, поскольку позволяет избежать полного обхода всей цепочки блоков.

В режиме машины состояний каждый блокчейн регистрируется в структуре данных родительского блокчейна. Ссылка на дочерний блокчейн осуществляется с помощью хэш-суммы генезис-блока. Вероятность появления коллизии в криптографических хэш-функциях пренебрежимо мала. Это позволяет гарантировать уникальность хэш-суммы генезис-блока в пределах многомерного блокчейна с вероятностью, близкой к единице, при условии уникальности генезис-блока.

Адрес в пределах многомерного блокчейна представляется в текстовой форме. При этом адрес строится следующим образом:

$$DM.A.E.T.V\{DM.A.E.T.V\}^* \quad (1)$$

Рассмотрим адресацию на примере блока 0xaabbcc08 в блокчейне с режимом работы на основе состояний (рис. 4):

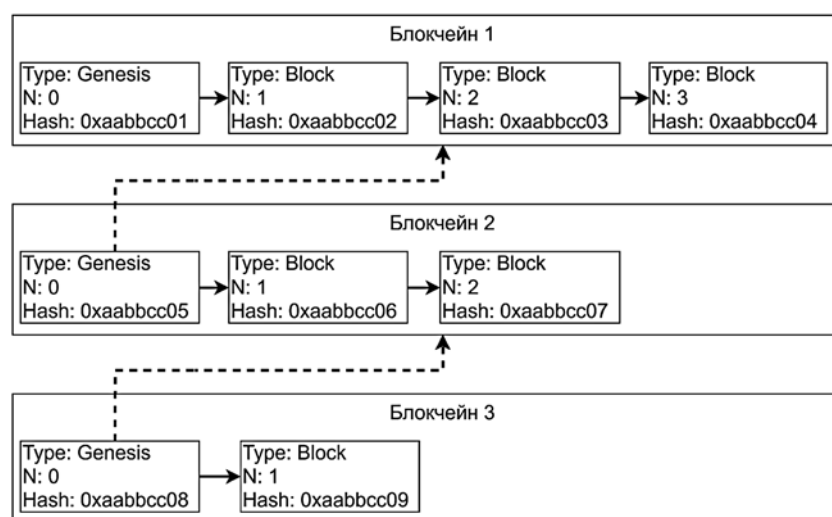


Рис. 4. Пример адресации в многомерном блокчейне в режиме машины состояний

Таблица 2

Нотация для адресации

Условное обозначение	Расшифровка	Множество допустимых значений	Описание
<i>D</i>	Delimiter	$[\backslash]^{*}a-zA-Z$	Разделитель, используется для перехода на следующий уровень иерархии (первый разделитель может быть опущен, если адресуется блок в текущем одномерном блокчейне)
<i>M</i>	Mode	$[sb]$	Режим работы блокчейна
<i>A</i>	Addressing mode	$[ar]$	Режим адресации — абсолютный и относительный
<i>E</i>	Entity	$[abct]$	Сущность
<i>T</i>	Type	$[NHLLA]$	Тип адреса
<i>V</i>	Value	$[a-zA-Z0-9]^{*}$	Значение

функция CHECK-OUTВходные параметры: ExtTX – внешняя транзакция

Выходные параметры: None

1. Для каждого получателя проверить допустимость выполнения транзакции. При неудаче прекратить исполнение.
2. Проверить синтаксическую и семантическую корректность транзакции. При неудаче прекратить исполнение.
3. Проверить допустимость совершения транзакции пользователем-инициатором. При неудаче прекратить исполнение.

функция SEND-EXT-TXВходные параметры: ExtTX – внешняя транзакция

Выходные параметры: None

1. Вызвать CHECK-OUT(ExtTX)
2. Применить транзакцию к реестру
3. Если флаг NOTIFY_ACCEPTORS установлен, то отправить уведомление в реестр каждого получателя.

функция CHECK-INВходные параметры: ExtTX – внешняя транзакция

1. Для реестра-инициатора проверить допустимость выполнения транзакции. При неудаче прекратить исполнение.
2. Установить таймер приема внешней транзакции.
3. Для реестра-инициатора проверить наличие внешней транзакции с использованием протокола поиска в многомерном блокчейне. При неудаче прекратить исполнение.

4. По истечении времени таймера проверить отсутствие приема транзакции в текущем реестре. При неудаче прекратить исполнение.

функция SEND-EXT-TX

1. Получить транзакцию ExtTX от пользователя или из реестра через уведомление.

2. Вызвать CHECK-IN(ExtTX).

3. Применить транзакцию к реестру.

Рис. 5. Псевдокод работы реестра-отправителя и реестра-получателя

/s.a.c.N.0xaabbcc08/s.a.b.N.0

/s.a.c.N.0xaabbcc08/s.a.b.N.0xaabbcc08

Обозначения раскрыты в табл. 2.

Внешние транзакции в многомерном блокчейне

Под транзакцией в распределенных системах понимается упорядоченный набор применяемых к состоянию преобразований. Сообщением является структурированный набор данных, пересылаемый в пределах сети передачи информации. В данной работе под внешней транзакцией подразумевается упорядоченная последовательность логических операций, охватывающая два и более распределенных реестра. Инициатором называется реестр, в котором начинается внешняя транзакция, а остальные реестры (в том числе, при необходимости, исходный) — получателями или акцепторами. Соответственно, любая внешняя транзакция включает две фазы: инициацию и акцепт. При этом получателей в любой внешней транзакции может быть много, однако инициатор всегда один.

Упрощенный порядок работы реестра-отправителя и реестра-получателя представлены на рис. 5.

Преимущества многомерного блокчейна

Можно выделить несколько преимуществ многомерного блокчейна перед аналогами:

1) децентрализованное принятие решений (аналогично одномерному блокчейну) [12, 13];

2) безопасный обмен информацией между системами;

3) масштабирование существующих решений;

4) увеличение скорости генерации информации при сохранении исходных значений параметров, влияющих на свойства безопасности.

Первое и второе преимущества следуют из принципов построения системы и порядка ее работы. Одноранговые сети и механизмы достижения консенсуса обеспечивают децентрализацию. Этому посвящено множество работ по доказательству работы, доказательству доли владения и византийским протоколам. Безопасный обмен информацией обеспечивается протоколом проверки наличия транзакций во внешнем реестре при условии сохранения протоколом свойств устойчивых распределенных реестров [14].

При замене одномерного блокчейна на многомерный аналог возможно достичь экономии памяти отдельными узлами вычислительной сети. Наиболее существенные факторы, влияющие на размер базы данных реестра, — размер блока и период генерации требуемого для формирования блока числа транзакций. Используются следующие условные обозначения:

- LV — объем реестра;
- N_L — число реестров;
- T — период генерации транзакций отдельным аккаунтом;
- T_0 — период генерации транзакции системой;
- ν — частота генерации транзакций отдельным аккаунтом;
- ν_0 — частота генерации транзакций системой;
- N_A — число аккаунтов;
- p_i — доля аккаунтов, перешедших в дочерний блокчейн;
- t — время;
- s — размер одной транзакции;
- S — размер блока;
- N_{TX} — число транзакций в блоке;
- T_s — продолжительность временного слота.

Масштабирование распределенного реестра с использованием многомерного блокчейна влечет разделение всех пользователей на группы. Количество генерируемой информации в каждом вложенном реестре оказывается меньше, чем количество генерируемой информации в исходной системе. Возможны два варианта изменения исходных параметров:

1) сохранение неизменного размера блоков при увеличении периода их генерации. Уменьшение числа аккаунтов приводит к снижению общего числа транзакций в единицу времени, следствием чего является уменьшение скорости создания блоков прежней величины;

2) сокращение размера блоков при сохранении скорости генерации блоков. Некоторые механизмы достижения консенсуса и прикладные приложения требуют поддержания постоянной скорости генерации блоков. Соблюдение этого требования повлечет уменьшение размера бло-

ков при неизменном числе транзакций в единицу времени в рамках всей системы.

Эти условия не могут выполняться одновременно, поскольку одновременное изменение обоих параметров не допускается современными механизмами достижения консенсуса.

Уменьшение периода генерации блоков. Пусть исходный реестр разделен на N_L реестров. Доля перемещенных в каждый реестр аккаунтов определяется следующим соотношением:

$$p_i = \frac{N_A^{(i)}}{N_A}. \quad (2)$$

Поскольку добавления новых аккаунтов не происходит, то

$$\sum_i p_i = \frac{\sum_i N_A^{(i)}}{N_A} = 1. \quad (3)$$

Частота генерации транзакций представляет собой число транзакций, генерируемых в единицу времени, что для исходного реестра определяется соотношением

$$\nu = \frac{1}{T} \Rightarrow \nu_0 = N_A \nu = \frac{N_A}{T}. \quad (4)$$

Следовательно, период генерации транзакции системой равен

$$T_0 = \frac{1}{\nu_0} = \frac{T}{N_A}. \quad (5)$$

Объем реестра определяется по формуле

$$LV = \left[\frac{t}{T_0} \right] S, \quad (6)$$

где $[.]$ — целая часть числа.

Число аккаунтов в каждом новом реестре меньше исходного, при этом выполняется следующее соотношение:

$$N_A^{(i)} = p_i N_A. \quad (7)$$

Соответственно увеличивается период генерации транзакций при уменьшении числа транзакций в единицу времени:

$$T_0^{(i)} = \frac{T}{N_A^{(i)}} = \frac{T}{N_A} \frac{1}{p_i} = \frac{T_0}{p_i}; \quad (8)$$

$$\nu_0^{(i)} = \frac{p_i}{T_0}. \quad (9)$$

Объем отдельного реестра удовлетворяет соотношению

$$LV^{(i)} = \left[\frac{t}{T_0^{(i)}} \right] S = \left[\frac{t}{T_0} \right] p_i S = LV \cdot p_i. \quad (10)$$

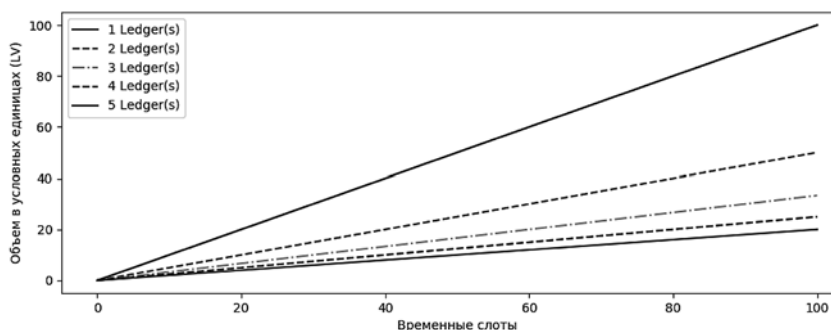


Рис. 6. Объем информации, хранимой узлами многомерного блокчейна

Следовательно, среднее значение объема реестра в произвольный момент времени равно

$$\overline{LV} = \frac{\sum_i LV^{(i)}}{N_L} = \frac{LV \sum_i p_i}{N_L} = \frac{LV}{N_L}. \quad (11)$$

В среднем объем отдельного реестра при применении многомерного блокчейна оказывается меньше в N_L раз. Пример для линейного роста объема реестра приведен на рис. 6.

Уменьшение размеров блоков. Пусть неизменным остается период генерации блоков в каждом реестре. Тогда размер каждого блока равен

$$S = sN_{TX} = sN_A v T_s. \quad (12)$$

Уменьшение числа аккаунтов приводит к снижению числа транзакций и, соответственно, размеров блока:

$$S^{(i)} = sN_{TX}^{(i)} = sN_A^{(i)} v T_s = \frac{S}{N_A} N_A^{(i)} = S p_i. \quad (13)$$

Тогда объем отдельного реестра составляет

$$LV^{(i)} = \left[\frac{t}{T} \right] S^{(i)} = \left[\frac{t}{T} \right] S p_i = LV p_i. \quad (14)$$

Среднее значение объема реестра в произвольный момент времени равно

$$\overline{LV} = \frac{\sum_i LV^{(i)}}{N_L} = \frac{LV \sum_i p_i}{N_L} = \frac{LV}{N_L}. \quad (15)$$

Следовательно, уменьшение размера блоков и увеличение периода генерации транзакций оказывают сопоставимое влияние на объем информации, хранимой каждым поддерживающим систему узлом. Стоит отметить, что данная оценка не учитывает применение таких механизмов, как шардинг, который позволяет еще более сократить объем хранимой информации.

График изменения скорости роста объема реестра при последовательном увеличении

числа дочерних реестров приведен на рис. 7. В данном случае предполагается линейная зависимость количества хранимой информации от времени и равномерное распределение узлов по реестрам. При правильном выборе момента для создания нового реестра средний объем хранимой отдельным узлом вычислительной системы информации может поддерживаться относительно постоянным.

Данная модель не учитывает того факта, что объем информации в начале работы системы больше единицы. Многомерный блокчейн подразумевает постепенное создание новых вложенных блокчейнов. Одним из возможных направлений для исследования может стать оптимизационная задача поиска оптимального момента времени для разделения блокчейна и требуемого числа вложенных блокчейнов.

Рассмотрим увеличение числа аккаунтов. Предложенная ранее модель основана на соотношении (2). Число аккаунтов в системе должно оставаться неизменным, что не отражает реального положения дел, когда для каждого реестра характерно увеличение не только числа транзакций, но и числа аккаунтов. В этом случае соотношение (2) более не выполняется и заменяется следующим соотношением:

$$\sum_i p_i = \frac{\sum_i N_A^{(i,k)}}{N_A} = \frac{\sum_i N_A^{(i)} + k}{N_A} = 1 + \frac{k}{N_A}. \quad (16)$$

Иными словами, совокупное число аккаунтов увеличивается на k . Средняя нагрузка на узлы вычислительной системы в многомерном блокчейне определяется соотношением

$$\overline{LV'} = \frac{\sum_i LV_i}{N_L} = \frac{\sum_i p_i \cdot LV}{N_L} = \frac{LV}{N_L} \left(1 + \frac{k}{N_A} \right), \quad (17)$$

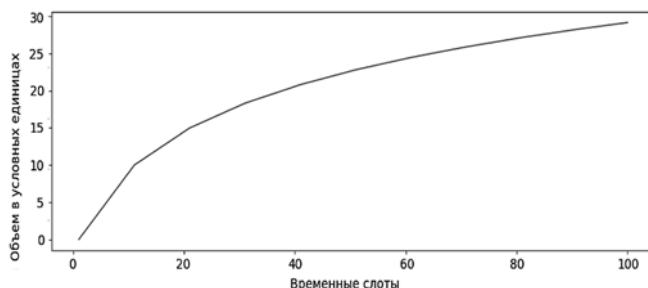


Рис. 7. Объем информации при последовательном увеличении числа реестров

тогда как для одномерного блокчейна — соотношением

$$T_0 = \frac{T}{N_A + k} \Rightarrow \overline{LV} = LV = \frac{t}{T_0} S = \frac{t(N_A + k)}{T} S = LV \left(1 + \frac{k}{N_A} \right). \quad (18)$$

Средняя нагрузка на узлы вычислительной системы в случае многомерного блокчейна оказывается меньше в N_L раз, причем эффект более выражен в случае равномерного распределения узлов по вложенным блокчейнам. График зависимости объема хранимой отдельными узлами информации в данном случае не отличается от случая с постоянным числом пользователей (см. рис. 5), поскольку для произвольного числа реестров множитель $\left(1 + \frac{k}{N_A} \right)$ является константой.

Рассмотрим число транзакций в единицу времени. Данный показатель является ключевым при описании преимуществ блокчейна перед иными способами построения реестров. Измерение точных значений затруднено необходимостью точной оценки числа узлов в вычислительной системе, что невозможно для распределенных систем без ограничений, накладываемых на участие. Однако оценка из-

менения числа транзакций (TPS) в единицу времени в многомерном блокчейне относительно одномерного аналога возможна. Эта оценка приведена на рис. 8. В каждом временном слоте число блокчейнов возрастает на единицу. На рис. 8, а демонстрируется рост общего числа транзакций в единицу времени при условии сохранения прироста числа транзакций в каждом блокчейне. Рис. 8, б отражает рост числа транзакций в единицу времени в системе в целом при неизменной нагрузке на каждый блокчейн. На рис. 8, в отражено снижение нагрузки на каждый блокчейн в отдельности при росте числа блокчейнов с учетом ограниченности их ресурсов и в условиях постоянного роста числа транзакций (до определенного граничного значения — в данном случае 0,75). Рис. 8, г отражает снижение нагрузки на каждый блокчейн в отдельности при постоянной нагрузке на систему.

Выводы

Предложенная технология — многомерный блокчейн — является развитием концепции одномерного блокчейна, используемой в основе многих современных распределенных реестров. Решение проблем масштабирования и безопасного обмена информацией между реестрами позволит значительно ускорить внедрение технологии на практике. Применение многомерного блокчейна возможно в различных сферах — в банковском и финансовом секторах экономики, системах управления доменными именами, системах управления версиями программного обеспечения, системах государственного управления, системах управления производством и т.д.

В то же время, для многих существующих систем на основе блокчейна не была проведена оценка безопасности их функционирования, что теоретически может привести к их компрометации. Поэтому перед реализацией систем на основе многомерного блокчейна и их использованием требуется оценить безопасность предлагаемого решения с использованием теории вероятностей и фреймворка универсальной композиции [15].

Список литературы

1. Cachin L., Guerraoui R., Rodrigues L. Introduction to Reliable and Secure Distributed Programming. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
2. Равал С. Децентрализованные приложения. Технология Blockchain в действии (Серия "Бестселлеры O'Reilly"). СПб.: Питер, 2017. 240 с.
3. Свон М. Блокчейн. Схема новой экономики. М.: Олимп-Бизнес, 2015.

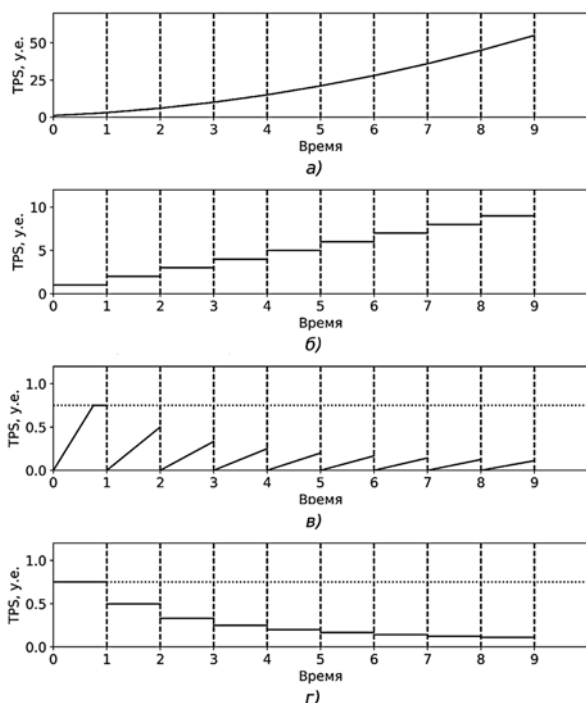


Рис. 8. Показатель TPS в многомерном блокчейне:

а — совокупный TPS при росте TPS в каждом блокчейне; б — совокупный TPS при неизменном TPS в каждом блокчейне; в — TPS в отдельном блокчейне при росте совокупного TPS; г — TPS в отдельном блокчейне при постоянном совокупном TPS

4. Лекомцева М., Нестерова Н., Семенов В. Анализ рисков информационной безопасности в банке // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2006. № 29.

5. Vukolic M. Rethinking permissioned blockchains // Proceedings of the ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies and Contracts (BCC '17). 2017. P. 3–7. DOI: 10.1145/3055518.3055526.

6. Kiayias A. Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol / A. Kiayias, A. Russell, B. David, R. Oliynykov // In CRYPTO 2017, Part I (LNCS). 2017. Vol. 10401. Springer, Heidelberg, 357–388.

7. David B. Ouroboros Praos, Gazi P., Kiayias A., Russell A. An adaptively-secure, semi-synchronous proof-of-stake protocol // Cryptology ePrint Archive, Report 2017/573. 2017.

8. Antonopoulos A. Mastering Bitcoin. Sebastopol: O'Reilly Media, 2014. 298 p.

9. Gazi P., Kiayias A., Zindros D. Proof-of-Stake Sidechains // 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). 2019. Vol. 1. P. 677–694.

10. Garay J., Kiayias A., Leonardos N. The Bitcoin Backbone Protocol with Chains of Variable Difficulty // Advances in Cryptology — CRYPTO 2017. Lecture Notes in Computer Science. 2017. V. 10401. P. 291–323. DOI: 10.1007/978-3-319-63688-7_10.

11. Garay J., Kiayias A., Leonardos N. The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications // Advances in Cryptology — Eurocrypt 2015, Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9057. P. 281–310. DOI: 10.1007/978-3-662-46803-6_10.

12. Pease M., Shostak R., Lamport L. Reaching agreement in the presence of faults // Journal of the ACM (JACM). 1980. Vol. 27. N. 2. P. 228–234.

13. Pass R., Seeman L., Shelat A. Analysis of the Blockchain Protocol in Asynchronous Networks // Advances in Cryptology — EUROCRYPT 2017. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham, 2017. Vol. 10211.

14. Hirt M., Zikas V. Adaptively secure Broadcast // Eurocrypt'2010, LNCS 6110. 2010. P. 466–485.

15. Canetti R. Universally composable security: A new paradigm for cryptographic protocols // Cryptology ePrint Archive, Report 2000/067, December 2000. Revised edition, July 2013.

I. M. Shilov, e-mail: ilia.shilov@yandex.ru, D. A. Zakoldaev, PhD, e-mail: d.zakoldaev@mail.ru, ITMO University, Saint Petersburg, Russian Federation

Multidimensional Blockchain and its Advantages

The paper observes key disadvantages of robust ledgers based on blockchain technology. Most severe problems of such technologies include rapid increase of data for storage and the necessity to use mediators during information exchange between different systems. The purpose of this paper is solution of these problems which can be compatible with existing solutions. A new approach to building robust distributed ledgers based on existing solutions — multidimensional blockchain — is presented as one of potential mitigations. The paper contains description of possible modes of multidimensional blockchain functioning and its key peculiarities. The main advantages of multidimensional blockchain are excessive use of external transactions and system-wide addressing of transactions, blocks and accounts. External transactions are held in stages which mitigates double-spending attacks and preserves system independence. Initiating step is similar to sending usual transaction while accepting step implies usage of search and validation protocol. Numeric assessment of key features of multidimensional blockchain is presented. These include transactions per second, block generation period, amount of data stored by network nodes. Transactions per second are assessed under various circumstances: when amount of transactions generated in one time slot is static and when it is not. Those features are compared to analogs (currently — cryptocurrencies). The results can be used in building systems based on robust distributed ledgers and are a basis for formal security proof of the proposed solution.

Keywords: blockchain, robust distributed ledger, multidimensional blockchain, scaling, addressing, transactions, transactions per second, availability, integrity, liveness, persistence

DOI: 10.17587/it.26.360-367

References

1. Cachin C., Guerraoui R., Rodrigues L. Introduction to Reliable and Secure Distributed Programming, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

2. Raval S. Decentralized applications. Blockchain technology in action, SPb., Piter, 2017, 240 p. (in Russian).

3. Swan M. Blockchain: Blueprint for a New Economy. Moscow, Olimp-Business, 2015 (in Russian).

4. Lekomtseva M., Nesterova N., Semenov V. Analysis of information security risks in bank, *Nauchno-technicheskiy vestnik informatsionnykh technology, mekhaniki i optiki*, 2006, vol. 29, pp. 172–174.

5. Vukolic M. Rethinking permissioned blockchains, *Proceedings of the ACM Workshop on Blockchain, Cryptocurrencies and Contracts*, 2017, pp. 3–7.

6. Kiayias A., Russel A., David B., Oliynykov R. Ouroboros: A Provably Secure Proof-of-Stake Blockchain Protocol, *CRYPTO 2017, Part I (LNCS)*, 2017, vol. 10401, Springer, Heidelberg, pp. 357–388.

7. David B., Gazi P., Kiayias A., Russell A. Ouroboros Praos: An adaptively-secure, semi-synchronous proof-of-stake protocol, *Cryptology ePrint Archive, Report 2017/573*, 2017.

8. Antonopoulos A. Mastering Bitcoin, Sebastopol, O'Reilly Media, 2014.

9. Gazi P., Kiayias A., Zindros D. Proof-of-Stake Sidechains. 2019 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), 2019, vol. 1, pp. 677–694.

10. Garay J., Kiayias A., Leonardos N. The Bitcoin Backbone Protocol with Chains of Variable Difficulty, *Advances in Cryptology — CRYPTO 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10401, pp. 291–323.

11. Garay J., Kiayias A., Leonardos N. The bitcoin backbone protocol: Analysis and applications, *Advances in Cryptology — Eurocrypt 2015, Lecture Notes in Computer Science*, 2015, vol. 9057, pp. 281–310.

12. Pease M., Shostak R., Lamport L. Reaching agreement in the presence of faults, *Journal of the ACM (JACM)*, 1980, vol. 27, no. 2, pp. 228–234.

13. Pass R., Seeman L., Shelat L. Analysis of the Blockchain Protocol in Asynchronous Networks, *Advances in Cryptology — EUROCRYPT 2017. Lecture Notes in Computer Science*, 2017, vol. 10211.

14. Hirt M., Zikas V. Adaptively secure Broadcast, *Eurocrypt'2010, LNCS 6110*, 2010, pp. 466–485.

15. Canetti R. Universally composable security: A new paradigm for cryptographic protocols, *Cryptology ePrint Archive, Report 2000/067*, December 2000, Revised edition, July 2013.

А. Г. Карамзина, канд. техн. наук, доц., e-mail: karamzina@tc.ugatu.ac.ru,
Уфимский государственный авиационный технический университет

Современные информационные технологии в образовательном процессе технического университета¹

Представлен опыт разработки и внедрения в образовательный процесс электронного образовательного ресурса "Лекция". Описаны основные этапы проектирования электронного образовательного ресурса. Выполнено функциональное моделирование процесса разработки электронного образовательного ресурса. Представлена схема создания электронного образовательного ресурса с учетом инструментальных средств. Раскрыты особенности создания образовательного контента (видеолекций, скринкастов, тестовых заданий) в конструкторе курсов iSpring Suite. Представлена структура электронного образовательного ресурса. Выделены особенности разработки электронного образовательного ресурса средствами системы дистанционного обучения MOODLE. Приведен анализ результатов онлайн-обучения.

Ключевые слова: электронное обучение, электронный образовательный процесс, электронный образовательный ресурс, конструктор электронных учебных курсов iSpring Suite, платформа MOODLE, информационная среда вуза

Введение

Международная комиссия по вопросам образования, науки и культуры при ООН (ЮНЕСКО) провозгласила ряд принципов современного образования, основными из которых являются повышение качества образования путем диверсификации его содержания и методов, а также содействие экспериментам, новаторству, публикациям и обмену данными и передовым опытом [1]. Организация объединяет, информирует и направляет мировое сообщество высшего образования в таких вопросах, как мобильность, признание квалификации, повышение качества образования и межуниверситетское сотрудничество. Некоторые из этих вопросов может решить внедрение онлайн-обучения в систему высшего образования.

Новый образовательный стандарт 3++ предполагает использование электронного обучения, дистанционных образовательных технологий. Вузы вынуждены расширять свою образовательную деятельность в онлайн-среде, и все большее число преподавателей включается в разработку и проведение онлайн-курсов.

К настоящему времени накоплен большой опыт перестройки традиционного образовательного процесса под воздействием информационных технологий и интерактивного интернета. И в противовес традиционной системе образовательного процесса, протекающего в основном в аудитории, возникают и развиваются модели электронного обучения [2].

Электронное обучение сильно продвинуло в развитии систему образования, сделало его более доступным. Сегодня электронное обучение стремительно развивается по всему миру. История возникновения электронного обучения началась в начале 21 века. Каждый период развития характеризуется своими особенностями, достижениями и связан с изменениями в методах и средствах реализации электронного обучения, вызванными бурным развитием средств компьютерной техники и связи. Основу электронного обучения составляют следующие технические достижения:

- появление новой среды накопления информации;
- развитие средств связи;
- развитие компьютерной техники;
- возможность автоматизированной обработки информации;
- возникновение и бурное развитие сети Интернет.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-08-00638).

Лидерами в области развития электронного обучения остаются США, Южная Корея и Западная Европа. В европейских странах в сфере образования отрасль развивается в основном за счет государственных дотаций, а в США действует коммерческая система. В нашей стране к настоящему времени электронное обучение прошло несколько этапов. Сначала был период, который можно назвать пионерским, когда разработкой и внедрением занимались отдельные вузы. Затем наступил период государственных инициатив, подкрепленный нормативно-правовой базой реализации электронного обучения и дистанционных образовательных технологий [3–5]. Начали создаваться образовательные платформы для реализации онлайн-обучения ("Лекториум", "Открытое образование", *Stepik*) [6–8]. Сейчас можем наблюдать период коммерческого развития, когда электронное обучение онлайн активно используется для получения дополнительного образования, повышения квалификации. Согласно статье [9] в 2018 г. россияне потратили на дополнительное онлайн-образование больше 1,3 млрд руб.

Вопросам применения мультимедийных информационных технологий в образовательном процессе уделяется большое внимание [10–13]. Учебный контент в электронном обучении состоит, как и в традиционном обра-

зовательном процессе, из учебников, лекций, практических, лабораторных заданий, тестов и экзаменов, но реализованных в электронном виде. В работах [14, 15] приведены примеры разработки лекционных занятий, в [16–18] авторы представляют результаты апробации электронного обучения для выполнения лабораторного практикума. В работах [19, 20] поднимаются вопросы оценки качества усвоения изучаемых дисциплин, а в [21, 22] рассматриваются вопросы моделирования, навигации в электронных образовательных ресурсах.

В данной статье автор приводит результаты проектирования, разработки, внедрения и использования электронного образовательного ресурса "Лекция" в образовательном процессе.

1. Электронный образовательный ресурс

Для реализации электронного образовательного процесса требуются проектирование, разработка и внедрение современных средств обучения, одним из которых является электронный образовательный ресурс (ЭОР). Это образовательный ресурс, представленный в электронно-цифровой форме и включающий в себя структуру, предметное содержание и мета-данные о них [23].

В процессе проектирования ЭОР необходимо:

- четко определить результаты обучения, на достижение которых онлайн курс направлен;
- разработать учебные задания, направленные на достижение заявленных результатов обучения и их оценку;
- наполнить образовательный контент — он должен быть не избыточным, а оптимально достаточным для достижения результатов обучения;
- организовать систему взаимодействия участников на всех стадиях образовательного процесса.

Для выявления взаимосвязи функций в процессе разработки ЭОР было выполнено функциональное моделирование на основе структурного подхода. Дерево диаграмм, отображающее иерархическую зависимость функций, представлено на рис. 1.

Декомпозиция функции "Разработка ЭОР "Лекция" представлена



Рис. 1. Дерево диаграмм



Рис. 2. Декомпозиция функции "Разработка ЭОР лекции"

на рис. 2. Исходной информацией для разработки ЭОР является лекционный материал. В качестве управляющей информации используется рабочая программа, инструкция по оформлению пояснительной записки (приказ № 2272-О по УГАТУ), инструкции по загрузке и созданию ЭОР. Механизмом реализации выступает преподаватель и инструменты, с помощью которых он создает электронный образовательный ресурс лекций (*iSpring Suite* и *MOODLE*). Также механизмом реализации является администратор, который осуществляет работу с курсом в системе управления обучения *MOODLE*.

Результатами выполнения функций являются педагогический сценарий и ЭОР.

Разработка педагогического сценария ведется на основе лекционного материала. Планирование педагогического сценария предполагает четкое видение автором образовательного пространства курса, его умение определить педагогические технологии в соответствии с особенностями целевой аудитории курса, тщательное проектирование содержания учебной деятельности. Педагогический сценарий содержит визитку ЭОР, учебно-методический план курса, сценарии видеолекций и скринкастов (видеозапись того, что происходит на экране компьютера со звуковыми или текстовыми комментариями), примерные тестовые задания, на основе которых материалы ЭОР создаются и редактируются с помощью редактора *iSpring Suite* и в нем же собираются в один файл в формате *SCORM* (совместимые учебные курсы, готовые для публикации). Стандарт *SCORM* является международной основой обмена электронными курсами, и отсутствие в системе его поддержки снижает мобильность и не позволяет создавать переносимые курсы. В учебно-методическом плане онлайн-курса отображена структура курса и его содержание. В результате опубликования курса в системе управления обучением *MOODLE* создается курс, наполняется его содержание и настраивается балльно-рейтинговая система (БРС) для оценки знаний после обучения.

Обобщенная схема создания ЭОР лекции представлена на рис. 3 [24].



Рис. 3. Создание электронного образовательного ресурса

2. Конструирование ЭОР в *iSpring*

В систему *iSpring* входит учебный портал *iSpring Learn* и конструктор курсов *iSpring Suite*. Решение ориентировано на быстрый запуск онлайн-обучения. С помощью *iSpring Suite* можно создавать образовательный контент: курсы, тесты, диалоговые тренажеры и скринкасты. В качестве обучающего материала в *iSpring* можно загружать презентации, изображения, видео- и аудиофайлы. При этом *iSpring Suite* устанавливается дополнительно как надстройка для *PowerPoint*, которая позволяет создавать электронные курсы из презентаций. В *iSpring Suite* входят шесть модулей, позволяющих создавать интерактивные курсы, тесты, диалоговые тренажеры, видеокурсы и книги [25].

Надстройка *iSpring Suite* на панели инструментов *Power Point* представлена на рис. 4.

С помощью данного конструктора курсов были разработаны следующие элементы ЭОР.

1. **Видеолекции.** Видеосопровождение в презентации размещено поверх слайда в виде отдельного объекта, который можно редактировать инструментами *PowerPoint*. При этом надстройка *iSpring Suite* содержит специальные макеты слайдов для размещения видеосопровождения для презентации. Для редактирования записанного сопровождения с синхронизацией со слайдами необходимо воспользоваться группой "Сопровождения" со следующими основными возможностями: запись аудиосопровождения; запись видеосопровождения; вставка аудиосопровождения; вставка видеосопровождения; синхронизация звука и видео с презентацией. В окне "Редактор сопровождения" (рис. 5) отображается список слайдов презентации и их аудиосопровождение (при выделении конкретного слайда отображаются заметки к нему). С помощью этого элемента также можно настроить синхронизацию звука и видео с презентацией.

В случае необходимости можно выполнить аудиоредактирование голосового ряда. Для этого нужно воспользоваться элементом "Редактировать клип" и запустить "Аудиоредактор" (рис. 6, см. вторую сторону обложки). Возможны следующие варианты: вставка "тишины"; обрезка выделенного фрагмента; уда-

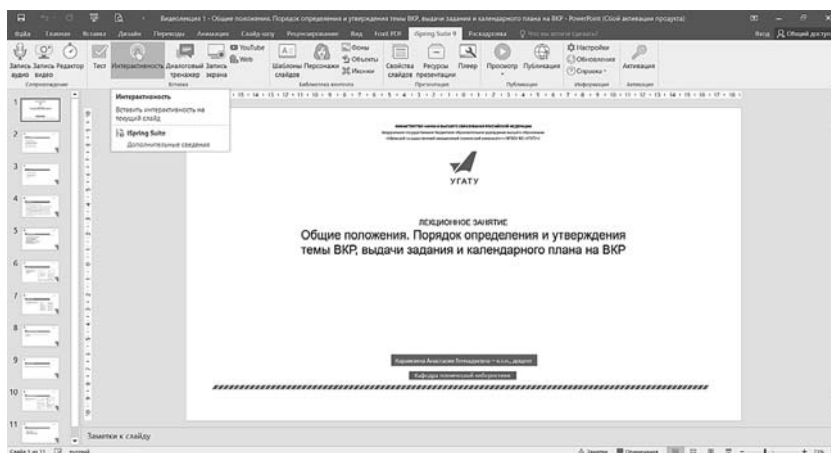


Рис. 4. Надстройка *iSpring Suite* в окне *Power Point*

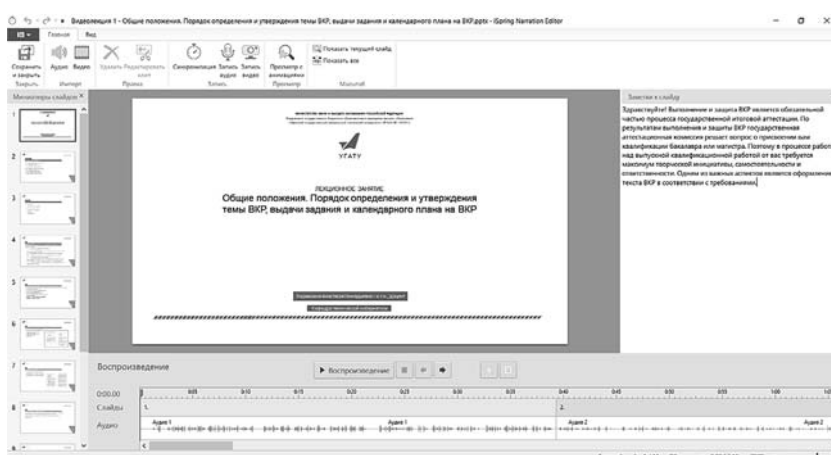


Рис. 5. "Редактор сопровождения" надстройки *iSpring Suite*

лить шум; регулировка громкости; настройка "Нарастания" и "Затухания".

Затем необходимо опубликовать презентацию в требуемом формате и просмотреть ее в готовом виде. Для этого следует воспользоваться группой "Публикация" на панели инструментов надстройки *iSpring Suite* (рис. 7, см. вторую сторону обложки). Возможны следующие варианты публикации (в нашем случае вариант 4):

- "Мой компьютер" (публикация на компьютер для дальнейшего распространения через интернет);
- публикация в *iSpring Cloud* (публикация в облачный сервис);
- публикация в *iSpring Learn*;
- система дистанционного обучения (публикация в формате, поддерживаемом системами дистанционного обучения — SCORM/AICC/TinCan/cmi5);
- "YouTube" (публикация видео в формате MP4 и загрузка в аккаунт YouTube).

2. **Скринкасты** (запись экрана). Конструктор курсов *iSpring Suite* предоставляет возмож-

ность записи скринкастов через окно быстрого запуска (рис. 8). Также запись скринкаста может быть осуществлена через надстройку *iSpring Suite в PowerPoint* с возможностью сохранить файл в формате *SCORM*. В этом случае запускается окно *iSpring Suite Cam Pro* (рис. 9).

Для выбора области записи экрана необходимо выбрать соответствующий вариант (пункт "Запись экрана"):

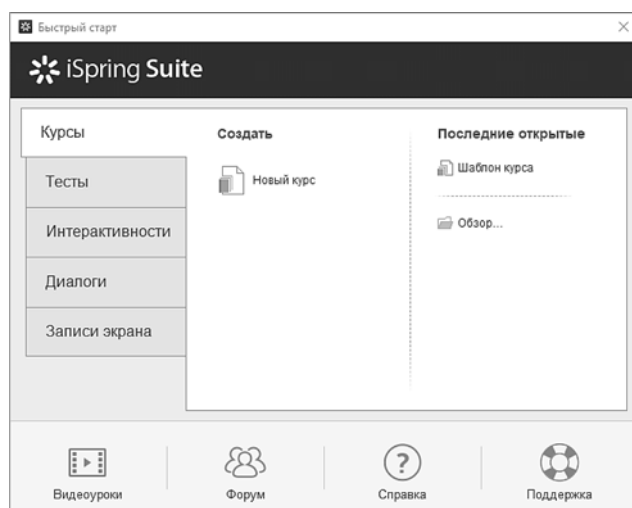


Рис. 8. Окно быстрого запуска *iSpring Suite*

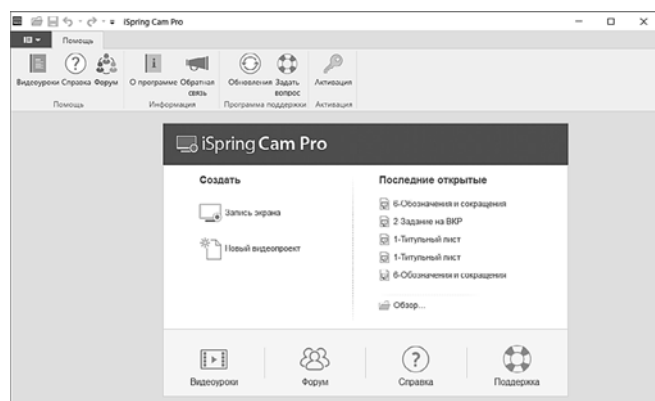


Рис. 9. Окно *iSpring Suite Cam Pro*

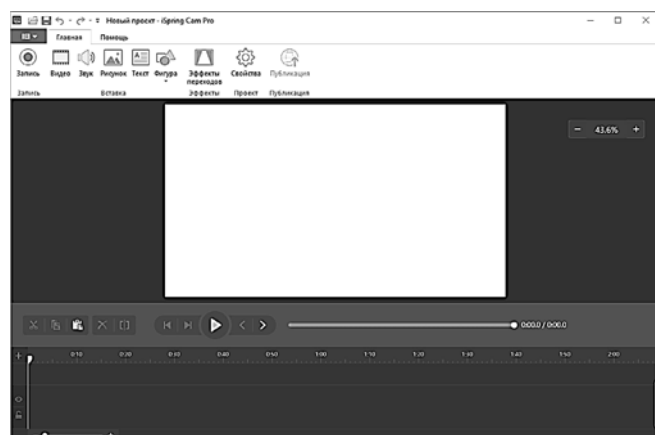


Рис. 10. Видеоредактор *iSpring Cam Pro*

- область экрана (размеры области выбираются из шаблонов: "Пользовательский"; "Видео 16:9"; "Видео 4:3" или задаются шириной и высотой области);
- полный экран;
- область приложения (область записи экрана принимает форму и положение окна приложения).

Полученную видеозапись можно отредактировать с помощью видеоредактора *iSpring Cam Pro* (рис. 10). Для этого предусмотрены:

- панель инструментов с опциями для вставки и настройки медиа объектов;
- холст для просмотра скринкастов, видеофрагментов, а также для вставки и редактирования изображений, текста, фигур);
- шкала времени с "дорожками", на которых расположены аудиофайлы, видеофайлы, изображения, текст или фигура.

Группа "Публикация" на панели инструментов надстройки *iSpring Suite* сохраняет видеозапись скринкаста в формате *MP4*.

3. *Тестовые задания*. В *iSpring Suite* поддерживаются два инструмента для проверки знаний: диалоговые тренажеры и тесты. При этом используется библиотека контента, которая содержит специальные персонажи и фоны. У персонажей есть эмоциональная шкала, а с помощью функции *iSpring TalkMaster* их можно озвучить. Тестирование — главный инструмент для проверки знаний в дистанционном обучении. В рамках разрабатываемого ЭОР предусмотрены промежуточные тесты по каждому модулю следующих видов: выбор одного ответа, выбор нескольких ответов, установить соответствие, установить последовательность. Тесты были разработаны в *iSpring Quizmaker* (рис. 11). Для заполнения полей вопросов и вариантов ответа (с учетом правильных ответов) необходимо воспользоваться вкладкой "Данные".

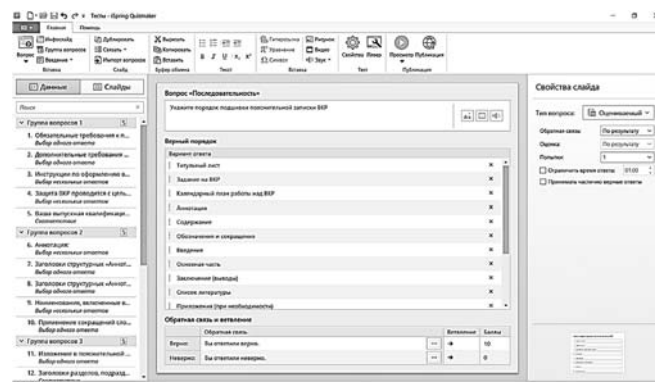


Рис. 11. Редактор тестов *iSpring Quizmaker*

Оформление теста выполняется во вкладке "Слайды". Тесты располагаются на слайдах, для которых предусмотрены специальные макеты, отличающиеся расположением областей вопроса и вариантов ответа.

На панели инструментов окна *iSpring Quiz-maker* в свойствах теста настраиваются:

- свойства теста (название теста, размер слайда теста, ограничение по времени);
- оценивание теста (тип оценивания и условия прохождения);
- свойства вопросов (порядок оценивания, число попыток, перемешивание вопросов, отображение правильного ответа);
- список вопросов (какие вопросы и из каких групп попадут в тест);
- отправка отчета.

Затем через группу "Публикация" на панели инструментов *iSpring Quizmaker* тест необходимо сохранить в формате *SCORM*.

3. Система управления обучением MOODLE

Система *MOODLE* — открытое веб-приложение, на базе которого можно создать специализированную платформу для обучения студентов. *MOODLE* поддерживает популярные стандарты в онлайн-обучении: *IMS*, *AICC* и *SCORM*. В качестве обучающего материала в *MOODLE* можно загружать презентации, изображения, видео-, аудио- и текстовые файлы. В системе *MOODLE* по умолчанию пользователям можно назначать роли и объединять их в группы [26].

Для создания ЭОР "Лекция" на сайте системы дистанционного обучения УГАТУ в личном кабинете необходимо выбрать вкладку создания курса. Результат создания и настройки курса представлен на рис. 12.

Для наполнения ЭОР содержанием необходимо выбрать "Добавить элемент или ресурс" и в открывшемся диалоговом окне выбрать формат загружаемого элемента, заполнить поля названия и описания элемента и добавить элемент в соответствующую тему. В рамках разрабатываемого ЭОР "Лекция" в качестве дополнительного материала использованы файлы формата *DOC* и гиперссылки.

Результат наполнения курса представлен на рис. 13.

Запись студентов на курс осуществляется через глобальные группы студентов или индивидуально через кнопку "Запись пользователей на курс". В контексте системы дистанционного обучения УГАТУ созданы глобальные группы студентов и преподавателей кафедры. Результат записи студентов на курс представлен на рис. 14.

В списке участников курса отображаются фамилия и инициалы участников, адрес электронной почты, роль на курсе (студент, учи-

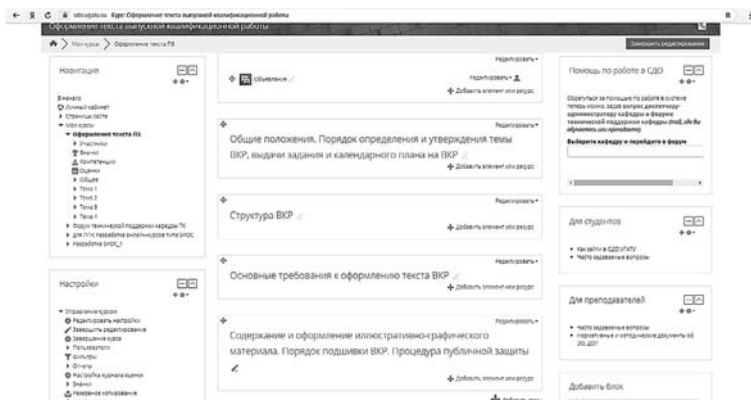


Рис. 12. Результат создания и настройки ЭОР "Оформление текста пояснительной записки"

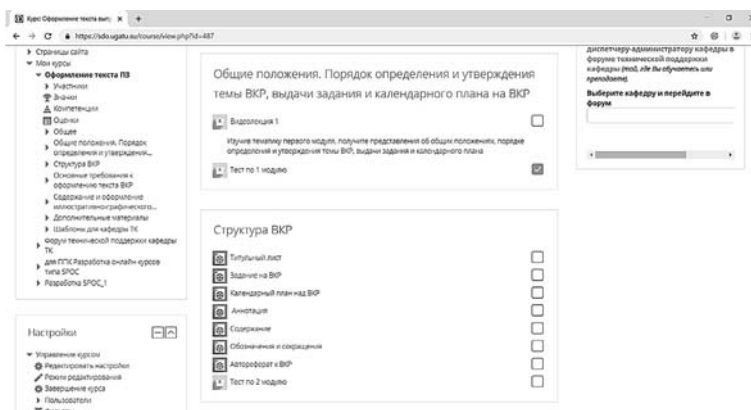


Рис. 13. Результат наполнения ЭОР "Лекция"

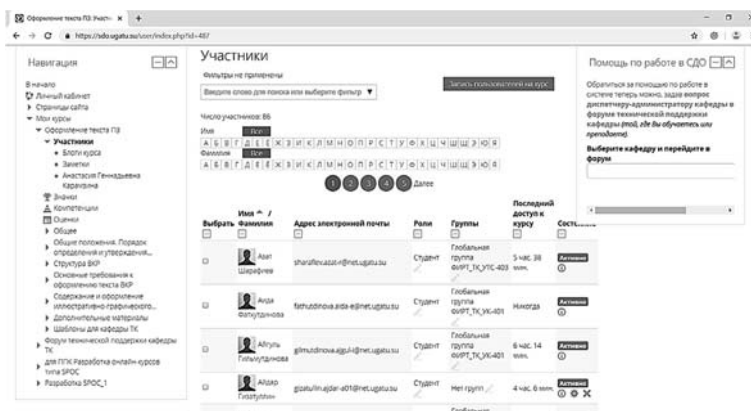


Рис. 14. Фрагмент списка участников, записанных на курс

тель, ассистент), группа, дата, когда был совершен последний доступ к курсу. Роль учителя на курсе присваивается автоматически создателю курса, который осуществляет запись участников на курс и назначает им роли.

4. Анализ результатов онлайн-обучения

В системе управления обучением MOODLE предусмотрено формирование отчета о деятельности участников, в котором отображается время, затраченное на определенный материал, число просмотров, частота посещения курса. Фрагмент отчета деятельности участников представлен на рис. 15.

В системе управления обучением MOODLE предусмотрена настройка отправки результатов прохождения каждого теста каждого студента на почту преподавателю. Автоматически формируется текст сообщения с приветствием и просьбой ознакомиться с результатами каждого студента. Также отображается информация о том, кто и когда проходил тест, сколько пра-

вильных ответов из общего объема тестовых заданий по теме теста. Кроме того, предоставляется информация о том, сколько студент набрал баллов и затратил времени на прохождение теста с точностью до доли секунды, а также результат — "пройден" или "не пройден" (рис. 16).

В MOODLE есть встроенная система аналитики, позволяющая формировать отчеты:

- по времени, затраченному на изучение курса;
- по активности на платформе;
- по результатам прохождения курса;
- по завершению элементов курса.

Загрузка отчета возможна в форматах Excel, XML, Open Document.

Заключение

Проведенное исследование позволило ознакомиться с актуальными тенденциями в развитии электронного обучения. Невозможно уйти от действительности и следует, наверное, принять ЭОР как новую активно развивающуюся реальность образования, в том числе и в высшей школе. Внедрение ЭОР в учебный процесс позволит его оптимизировать и повысить качество самостоятельной работы студента. Кроме того, современные образовательные стандарты ориентированы на четкие результаты обучения. Это особенно актуально для онлайн курсов, в силу их лаконичности как ресурсов, их оптимальности с точки зрения объема учебного материала и решаемых задач. Современный образовательный процесс должен реализовываться на основе информационной среды вуза, которая интегрирует в себе информационно-образовательные ресурсы, программно-технические и телекоммуникацион-

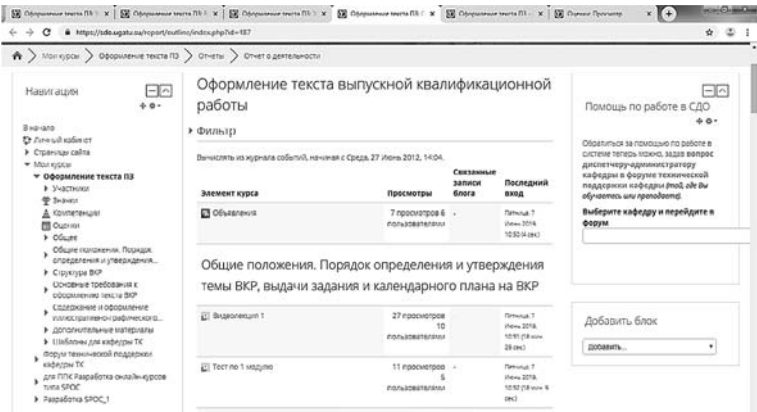


Рис. 15. Фрагмент отчета о деятельности участников

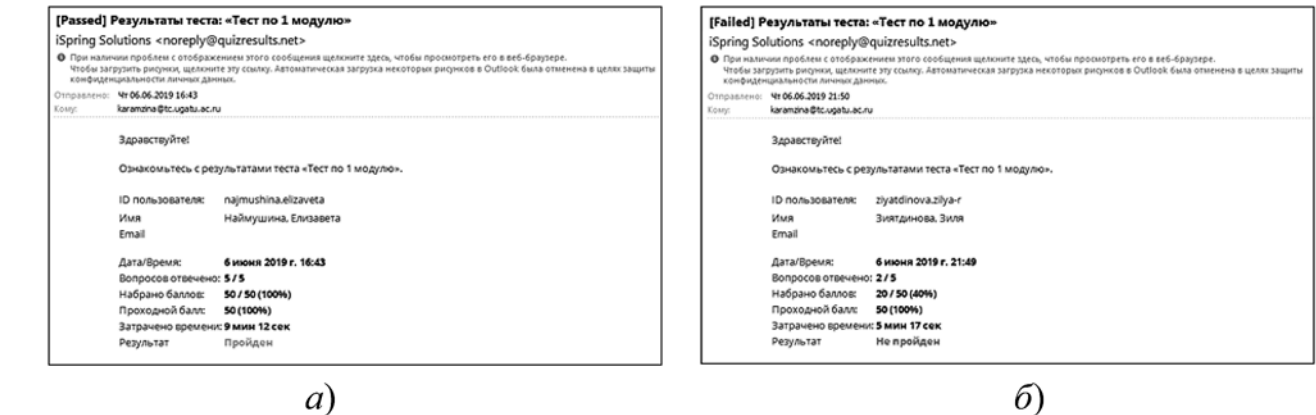


Рис. 16. Письмо с результатами прохождения теста:

а — пройден; б — не пройден

ные средства, правила их администрирования, поддержки, использования. При этом не нужно упускать, что разработка и внедрение в образовательный процесс электронных образовательных ресурсов позволят повысить эффективность обучения только в том случае, если они будут удовлетворять определенным критериям качества, включая визуализацию образовательного материала, повышение интерактивности обучения, доступ к источникам данных, своевременный контроль.

Список литературы

1. **Официальный сайт ООН ЮНЕСКО.** URL: <https://ru.unesco.org/themes/sistemy-obucheniya-na-protivazhenii-vsey-zhizni> (дата обращения: 25.06.19).
2. **Карамзина А. Г.** Онлайн обучение при реализации образовательных программ в области управления // Проблемы высшего образования: Материалы международной научно-методической конференции. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2019. С. 194—196.
3. **Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ** "Об образовании в Российской Федерации".
4. **Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 816** "Об утверждении Порядка применения организациями, осуществляющими образовательную деятельность, электронного обучения, дистанционных образовательных технологий при реализации образовательных программ".
5. **Приказ Министерства образования и науки РФ от 5 апреля 2017 г. № 301** "Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам высшего образования — программам бакалавриата, программам специалитета, программам магистратуры".
6. **Просветительский проект "Лекториум".** URL: <https://www.lektorium.tv/> (дата обращения: 15.10.19).
7. **Проект "Национальная платформа открытого образования".** URL: <https://openedu.ru/> (дата обращения: 15.10.19).
8. **Справочный центр Stepik.** URL: <https://support.stepik.org/hc/ru/articles/360000172234> (дата обращения: 18.10.19).
9. **Миронова К., Щуренков Н.** Учение — сеть // Газета "Коммерсантъ", № 15 от 29.01.2019, стр. 5.
10. **Яцевич Т. А., Леган М. В.** Об актуальности использования мультимедийных электронных образовательных ресурсов в образовательном процессе технических вузов // Инновации в образовании, 2013. № 11. С. 133—143.
11. **Арзуманова Н. В.** Использование современных информационных технологий в образовательном процессе // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2009. № 113. С. 86—90.
12. **Куценко С. М., Косулин В. В.** Электронные образовательные ресурсы как инструмент обучения // Вестник КГЭУ. 2017. № 4 (36). С. 38—44.
13. **Гаврилова И. Л.** Опыт разработки и внедрения в учебный процесс вуза электронного учебно-методического комплекса // Информационные технологии. 2017. Т. 23, № 6. С. 464—468.
14. **Джашитов В. Э., Панкратов В. М., Голиков А. В.** Мультимедийные информационно-компьютерные технологии в научно-образовательных курсах лекций и экспресс-контроле знаний по точным наукам // Информационные технологии. 2011. № 1. С. 44—48.
15. **Гайдамак Е. С., Закутская С. М., Федорова Г. А.** Интерактивные технологии в проведении лекционного занятия в условиях электронного обучения // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. 2017. № 3 (16). С. 137—140.
16. **Берчун Ю. В., Загидуллин Р. Ш.** Комплексный подход к организации удаленного доступа к лабораторному оборудованию в учебном процессе // Информационные технологии. 2015. № 3. С. 210—217.
17. **Юрин А. И., Красивская М. И., Дмитриев А. В., Злодеев Г. Ю.** Применение виртуальных лабораторных стендов в образовательном процессе // Информационные технологии. 2014. № 6. С. 70—72.
18. **Князева Е. М.** Лабораторные работы нового поколения // Фундаментальные исследования. 2012. № 6 (часть 3). С. 587—590.
19. **Бубнов Г. Г., Плужник Е. В., Солдаткин В. И.** Критерии оценки качества в системе электронного обучения // Cloud of science. 2015. Т.2, № 4. <https://cloudofscience.ru> (дата обращения: 05.12.19).
20. **Магомедова К. Т.** Оценка качества электронного обучения в образовательном учреждении // Наука, техника и образование. 2016. № 2 (20). <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-elektronnogo-obucheniya-v-obrazovatelnom-uchrezhdenii> (дата обращения: 10.12.2019).
21. **Зайцева О. В.** Формирование электронных образовательных ресурсов // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4. С. 21—26.
22. **Соловов А. В.** Моделирование навигации в электронных образовательных ресурсах // Информационные технологии. 2007. № 4. С. 72—79.
23. **ГОСТ Р 52653—2006.** Информационно-коммуникационные технологии в образовании. Термины и определения. Введ. 2008-07-01. М.: Изд-во стандартов. 7 с.
24. **Карамзина А. Г., Мерзико И. Н.** Информационные технологии в проектировании электронного образовательного ресурса // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2019): Тр. междунар. науч.-техн. конф. Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2019. С. 698—702.
25. **Якупов Р.** Платформы для онлайн-обучения: обзор возможностей и решаемых бизнес-задач // iSpring: сайт разработчика программ для дистанционного обучения. URL: <https://www.ispring.ru/elearning-insights/platforma-onlain-obucheniya> (дата обращения: 25.02.2019).
26. **Якупов Р.** Система электронного обучения и тестирования Moodle: обзор возможностей // iSpring: сайт разработчика программ для дистанционного обучения. URL: <https://www.ispring.ru/elearning-insights/moodle> (дата обращения: 29.04.2019).

A. G. Karamzina, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, e-mail: karamzina@tc.ugatu.ac.ru
Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Ufa, 450008, Russian Federation

Modern Information Technologies in the Educational Process of a Technical University

The article is devoted to the tasks of design, development, implementation and use of the e-learning resource "Lecture". The main stages of developing an e-learning resource are described. To identify the relationship of functions in the process of developing an e-learning resource, functional modeling of the subject area was carried out based on a structural approach.

The developing scheme of an e-learning resource is presented. The process of developing e-learning resources relies on tools. The features of creating educational content (video lectures, screencasts and test tasks) in the course designer of iSpring Suite are revealed. The developing of the pedagogical scenario is based on lecture material. The planning of the pedagogical scenario involves a clear vision by the author of the educational space of the course, his ability to determine pedagogical technologies in accordance with the characteristics of the target audience of the course, and carefully design the content of the educational activity. The pedagogical scenario includes a business card of an e-learning resource, a curriculum for the course, scenarios of video lectures and screencasts, sample test tasks on the basis of which the materials of an e-learning resource are created and edited using the iSpring Suite editor. Then the elements of educational content are collected in a training SCORM-course, ready for publication. As a result of the publication of the course in the MOODLE learning management system, a course was created, its content was filled, and a point-rating system for assessing knowledge after training was set up. An analysis of the results of online learning is presented.

Keywords: e-learning, e-learning process, e-learning resource, iSpring Suite e-learning course designer, MOODLE platform, university information environment

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 18-08-00638.

DOI: 10.17587/it.26.368-376

References

1. **Official** site of the UN UNESCO, available at: <https://ru.unesco.org/themes/sistemy-obucheniya-na-protivazhenii-vsey-zhizni> (date of access: 25.06.19) (in Russian).
2. **Karamzina A. G.** Online training in the implementation of educational programs in management, *Higher Education Issues — proceedings of the International scientific and methodological conference, Khabarovsk, Pacific National University Pub. House*, 2019, pp. 194—196 (in Russian).
3. **Federal** Law of December 29, 2012 No. 273-ФЗ "On Education in the Russian Federation" (in Russian).
4. **Order** of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated August 23, 2017 No. 816 "On approval of the Procedure for the use by organizations engaged in educational activities of e-learning, distance learning technologies in the implementation of educational programs" (in Russian).
5. **Order** of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated April 5, 2017 No. 301 "On the Approval of the Procedure for Organization and Implementation of Educational Activities for Higher Education Educational Programs — Bachelor's degree programs, specialty programs, and master's programs" (in Russian).
6. **Educational** project "Lectorium", available at: <https://www.lectorium.tv/> (date of access: 15.10.19) (in Russian).
7. **Project** "National Platform for Open Education", available at: <https://openedu.ru/> (дата обращения: 15.10.19) (in Russian).
8. **Stepik** Help Center, available at: <https://support.stepik.org/hc/ru/articles/360000172234> (date of access: 18.10.19) (in Russian).
9. **Mironova K., Schurenkov N.** Learning — Network, *Newspaper Kommersant*, no. 15 dated 01/29/2019, P. 5 (in Russian).
10. **Yatsevich T. A., Legan M. V.** On the relevance of using multimedia electronic educational resources in the educational process of technical universities, *Innovacii v obrazovanii*, 2013, no. 11, pp. 133—143 (in Russian).
11. **Arzumanova N. V.** Use of modern information technologies in the educational process, *Izvestija RGPU im. A. I. Gercena*, 2009, no. 113, pp. 86—90 (in Russian).
12. **Kutsenko S. M., Kosulin V. V.** Electronic educational resources as a learning tool, *Vestnik KGJeU*, 2017, no. 4 (36), pp. 38—44 (in Russian).
13. **Gavrilova I. L.** Experience in development and implementation of the learning process of the university electronic educational complex, *Informacionnye Tehnologii*, 2017, vol. 23, no. 6, pp. 464—468 (in Russian).
14. **Dzhashitov V. E., Pankratov V. M., Golikov A. V.** Multimedia information-computer technologies in scientific educational lectures and the express-examination of knowledge on the exact sciences, *Informacionnye Tehnologii*, 2011, no. 1, pp. 44—48 (in Russian).
15. **Gaydamak E. S., Zakutskaya S. M., Fedorova G. A.** Interactive technologies in conducting lecture in the e-learning conditions, *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye issledovaniya*, 2017, no. 3 (16), pp. 137—140 (in Russian).
16. **Berchun Yu. V., Zagidullin R. S.** Complex approach to the organization of remote access to the labware in educational process, *Informacionnye Tehnologii*, 2015, no. 3, pp. 210—217 (in Russian).
17. **Yurin A. I., Krasivskaya M. I., Dmitriev A. V., Zlo-deev G. Yu.** The use of virtual laboratory stands in the educational process, *Informacionnye Tehnologii*, 2014, no. 6, pp. 70—72 (in Russian).
18. **Knyazeva E. M.** New Generation Lab, *Fundamental'nye Issledovaniya*, 2012, no. 6 (part 3), pp. 587—590 (in Russian).
19. **Bubnov G. G., Pluzhnik E. V., Soldatkin V. I.** Criteria for assessing quality in the e-learning system, *Cloud of science*, 2015, vol. 2, no. 4, available at: <https://cloudofscience.ru> (дата обращения: 05.12.19) (in Russian).
20. **Magomedova K. T.** Evaluation of the quality of e-learning in an educational institution, *Nauka, tehnika i obrazovanie*, 2016, no. 2 (20), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-kachestva-elektronnogo-obucheniya-v-obrazovatelnom-uchrezhdenii> (date of access: 10.12.2019) (in Russian).
21. **Zaitseva O. V.** Formation of electronic educational resources, *Obrazovatel'nye Resursy i Tehnologii*, 2016, no. 4, pp. 21—26 (in Russian).
22. **Solovov A. V.** Modeling navigation in electronic educational resources, *Informacionnye Tehnologii*, 2007, no. 4, pp. 72—79 (in Russian).
23. **GOST R 52653—2006.** Information and communication technologies in education. Terms and Definitions. Enter 2008-07-01, Moscow, Publishing house of standards. 7 p. (in Russian).
24. **Karamzina A. G., Merziko I. N.** Information technology in the design of electronic educational resource, *Advanced Information Technology — proceedings of the international scientific and technical conference, Samara, Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Pub. House*, 2019, pp. 698—702 (in Russian).
25. **Yakupov R.** Platforms for online learning: an overview of opportunities and solved business tasks, *iSpring: distance learning software developer site*, available at: <https://www.ispring.ru/elearning-insights/platforma-onlain-obucheniya> (date of access: 25.02.2019) (in Russian).
26. **Yakupov R.** Moodle e-learning and testing system: feature overview, *iSpring: distance learning software developer site*, available at: <https://www.ispring.ru/elearning-insights/moodle> (date of access: 29.04.2019) (in Russian).

Т. Н. Астахова, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: ctn_af@mail.ru,
В. В. Косолапов, канд. техн. наук, доц., e-mail: vladimir.kosolapov@mail.ru,
А. А. Романова, ст. преп., e-mail: anya-romanova-07@yandex
Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
Т. М. Кондурцова, программист, e-mail: koketka03.94@mail.ru,
ИП Ахвердян Г. Г.

Разработка информационной системы автоматизации процесса формирования и согласования индивидуальных планов научно-педагогических работников

Важной проблемой создания автоматизированной системы формирования индивидуальных планов на кафедрах вуза являются высокие ресурсозатраты. На сегодняшний день данная проблема является актуальной, ее решение позволит повысить эффективность работы преподавателей и всего образовательного процесса в целом. Описана разработка информационной системы автоматизации процесса формирования и согласования индивидуальных планов научно-педагогических работников. Проведен научный эксперимент, позволяющий определить, влияет ли внедрение информационной системы для формирования и согласования индивидуальных планов на изменение сроков и этапов согласования и утверждения планов в вузе.

Ключевые слова: разработка, образовательное учреждение, автоматизация вуза, информационная система, ИС:Предприятие, автоматизация деятельности преподавателя

Введение

В современном мире становится невозможным осуществление эффективного управления образовательными процессами вуза без применения автоматизированных систем в различных аспектах данных процессов [1].

Одним из наиболее значимых направлений в автоматизации деятельности вуза является автоматизация деятельности научно-педагогических работников кафедр [2]. В сфере управления учебным процессом высших учебных заведений и деятельностью научно-педагогических работников создано огромное число программных комплексов, отличающихся по составу и возможностям. В частности, известная лаборатория ММиИС (ЮРГУЭС), являющаяся ведущим разработчиком программного обеспечения для автоматизации управления учебным процессом в образовательных организациях различного уровня, предлагает комплекс программ для автоматизации управления учебным процессом, который представлен следующими модулями: "Электронные ведомости", "Авторасписание", "Планы ВПО", "Приемная комиссия", "Деканат", "Семестровые графики", "Рабочие программы дисциплин", "Система тестирования", "Диплом Мастер", АС "Нагрузка вуза". Такой состав позволяет позиционировать данный комплекс как один из основополагающих компонентов системы качества вуза.

Другим популярным решением в сфере образования является программный продукт "ИС: Университет". Конфигурация "ИС: Университет" представляет собой решение для автоматизации управленческой деятельности в учреждениях высшего профессионального образования. Решение позволяет автоматизировать учет, хранение, обработку и анализ информации об основных процессах высшего учебного заведения: поступление в вуз, обучение, оплата за обучение, выпуск и трудоустройство выпускников, расчет и распределение нагрузки профессорско-преподавательского состава, деятельность учебно-методических отделов и деканатов, поддержка ФГОС-3 и уровневой системы подготовки (бакалавр, специалист, магистр) на уровне учебных планов и документов государственного образца об окончании вуза, формирование отчетности [3, 4].

Отсутствие в существующих программных решениях функционала управления индивидуальными планами преподавателей препятствует эффективному планированию деятельности научно-педагогических работников на учебный год, что определяет необходимость разработки и внедрения информационной системы для автоматизации процесса формирования и согласования индивидуальных планов.

Разработка систем для автоматизации деятельности кафедры описана в работах М. И. Ледовской "Разработка подсистемы ин-

формационной системы "Кафедра" [5], а также А. А. Горбунова "Решение на платформе "1С:Предприятие 8" для автоматизации деятельности преподавателя в высшем учебном заведении" [6]. Автоматизация учета деятельности преподавателей представлена исследованием Е. Ю. Головиной "Автоматизация процесса учета и контроля деятельности преподавателей кафедры" [7], Н. Н. Заботиной "Автоматизация бизнес-процессов учета и контроля деятельности НПР вуза средствами 1С" [8].

Научных работ, описывающих разработки для автоматизации процесса формирования и согласования индивидуальных планов преподавателей кафедры в настоящее время практически нет. Исключением является работа А. А. Акимова "Модуль автоматизации составления индивидуальных планов преподавателей информационно-аналитической системы мониторинга деятельности кафедры". Автор рассматривает модуль "Индивидуальный план" [9]. Однако разработка, которую описывает автор, является встраиваемым модулем комплексной системы мониторинга деятельности кафедры.

Таким образом, направление автоматизации формирования и согласования индивидуальных планов научно-педагогических работников не исследовано. Новизна данного проекта заключается в создании автоматизированной системы формирования индивидуальных планов на кафедрах вуза, не имеющей аналогов, решение которой позволит повысить эффективность работы преподавателей и всего образовательного процесса в целом.

1. Разработка информационной системы

Работа преподавателя вуза — это сознательная, целесообразная деятельность по обучению, воспитанию и развитию студентов. В зависимости от целей преподаватель вуза осуществляет следующие основные виды деятельности: педагогическую, научно-исследовательскую, профессиональную (по базовой специальности), административно-хозяйственную, управленческую, коммерческую или общественную [10].

Учебная, учебно-методическая, научно-исследовательская и организационно-методическая работа научно-педагогических работников определяется на учебный год индивидуальным планом, который

составляется, подписывается преподавателем, рассматривается на заседании кафедры и утверждается проректором по учебной работе [11].

Индивидуальный план является основным документом, определяющим объем и содержание работы преподавателя университета в пределах часов рабочего дня и недельной нагрузки.

Данная область деятельности научно-педагогических работников вуза нуждается в автоматизации посредством внедрения автоматизированных информационных систем, которые позволили бы повысить эффективность планирования рабочего времени преподавателей, значительно ускорить процесс согласования индивидуальных планов и снизить потери и затраты.

Информационная система "Формирование ИП" предназначена для автоматизации формирования и заполнения индивидуальных планов преподавателей, включая исполнение следующих процессов: ввод данных о преподавателях, ввод данных об ответственных лицах, ввод норм времени на учебный год, заполнение индивидуального плана преподавателя, согласование индивидуального плана ответственными лицами, корректировка индивидуального плана, печать утвержденного индивидуального плана по общепринятому формату.

Программной средой для разработки системы является платформа "1С: Предприятие".

Для распределения прав доступа в системе созданы пользователи с присвоенными соответствующими ролями. При запуске системы каждому пользователю необходимо пройти аутентификацию (рис. 1, см. третью сторону обложки).

Для работы с системой необходимо заполнить дополнительные справочники "Должности" и "Сотрудники". Справочник "Сотрудники" представляет собой иерархическую структуру вуза (рис. 2).

Для хранения информации об ответственных лицах, подписывающих индивидуальный

←

→

☆

Должности

Создать

📄

Наименование
📁 Директор института
— доцент
📁 Заведующий кафедрой
— к.т.н., доцент
📁 Методист УМУ
📁 Начальник УМУ
📁 Начальник управления исследованиями
📁 Проректор по ВР
📁 Проректор по УР

←

→

☆

Сотрудники

Создать

Создать группу

📄

ФИО	↓	Код	Должность	Зав кафедрой
📁 Сотрудники				
📁 Администрация		000009		
📁 Сотрудники кафедр		000008		
📁 Инженерный институт		000003		
📁 Институт ИТиСС		000001		
📁 Кафедра ИКТиСС		000005		
📁 Кафедра ИСиТ		000004		
— Бобышев Евгений Николаевич		000008	доцент	
— Косопалов Владимир Викторович		000010	к.т.н., доцент	✓

Рис. 2. Заполнение справочников

Период	Должность	Сотрудник
01.08.2018 0:00:00	Методист УМУ	Зуева С. В.
01.08.2018 0:00:00	Начальник УМУ	Шлыкова Л. А.
01.08.2018 0:00:00	Начальник управления исследованиями	Проваленова Н. В.
01.08.2018 0:00:00	Проректор по ВР	Замяткина Н. А.
01.08.2018 0:00:00	Проректор по УР	Касимова Ж. В.
15.08.2018 0:00:00	Методист УМУ	Колодкина Н. Н.

Рис. 3. Регистр сведений "Ответственные лица"

Индивидуальный план 000000001 от 13.08.2018 0:00:00

Провести и закрыть Записать Провести Печать Создать на основании -

Номер: 000000001 Дата: 13.08.2018 0:00:00

Сотрудник: Бобышев Евгений Николаевич

Учебный год: 2018 - 2019 Утверждение: №: 1а от: 22.08.2018

Загрузить нормы времени Исправить

N	Раздел	Вид работы	Норма времени	Показатели	Примерный объем	Срок выполнения
4	1.2.	Актуализация информации в ЭИОС ВУЗа	1,00		1,00	1 семестр
5	1.3.	Проверка конспектов лекций, практических и лабораторных работ	15,00		15,00	В течение года
6	1.3.	Участие в комиссиях по защите отчетов по практике (кроме руководителей) на каждого члена комиссии	0,30		0,30	2 семестр
7	1.3.	Участие в плановых мероприятиях: - Совет факультета	2,00		2,00	В течение года

Ответственный: Администратор

Рис. 4. Формирование индивидуального плана

Задачи пользователя

Создать

Номер	Наименование
000000024	Согласование зав.кафедрой

Согласование зав.кафедрой 000000024 от 22.01.2019 21:18:0...

Выполнено, закрыть Записать Выполнено Активировать Еще -

Наименование: Согласование зав.кафедрой

Дата: 22.01.2019 21:18:03

Бизнес-процесс: Согласование плана 000000004 от 14.08.2018 0:00:00

Точка маршрута: Согласование зав.кафедрой

Исполнитель: Косолапов Владимир Викторович

Должность: Заведующий кафедрой

Подразделение: Сотрудники кафедр

Объект: Индивидуальный план 000000004 от 14.08.2018 12:00:00

Инициатор: Бобышев Евгений Николаевич

Рис. 6. Задачи пользователей

Согласование			
Зав. кафедрой:	Косолапов Владимир Викторович	22.01.2019	Согласовано
Директор института:	Шамин Алексей Анатольевич	22.01.2019	Согласовано
Начальник упр. исслед.:	Проваленова Наталья Владимировна	22.01.2019	Согласовано
Проректор по ВР:	Замяткина Наталья Александровна	22.01.2019	Согласовано
Методист УМУ:	Колодкина Нина Николаевна	22.01.2019	Согласовано
Начальник УМУ:	Шлыкова Любовь Александровна	22.01.2019	Согласовано
Проректор по УР:	Касимова Жанна Владимировна	22.01.2019	Согласовано
Статус:	Согласован		Отменить согласование

Рис. 7. Согласованный индивидуальный план

план, необходимо внести данные в периодический регистр сведений "Ответственные лица" (рис. 3).

Нормы времени могут быть загружены в систему с помощью заранее подготовленного файла. Нормы времени загружаются на каждый учебный год.

После загрузки норм времени каждый преподаватель может создать документ "Индивидуальный план", указать учебный год и загрузить нормы времени, введенные ранее (рис. 4).

Каждому виду работ соответствует номер раздела индивидуально-го плана. Сотруднику необходимо оставить только нужные виды работ, после чего индивидуальный план может быть отправлен на согласование.

Индивидуальный план последовательно согласуется всеми ответственными лицами, начиная с заведующего кафедрой. Весь бизнес-процесс согласования представлен на рис. 5 (см. третью сторону обложки).

На каждом этапе бизнес-процесса ответственному лицу создается задача, в которой указывается индивидуальный план, требующий согласования (рис. 6).

Проверяющий может перейти в форму индивидуального плана и поставить отметки в полях, требующих исправления. После проверки индивидуального плана ответственное лицо ставит отметку о выполнении задачи, и бизнес-процесс переходит к следующему этапу.

Для согласования индивидуального плана ответственному лицу необходимо нажать кнопку "Согласовано". Кнопки доступны только соответствующим ответственным лицам. После согласования доступность кнопки пропадает и выводится информационная надпись о согласующем лице.

После завершения бизнес-процесса согласования статус индивидуального плана переходит в состояние "Согласован", и сам документ становится недоступным для редактирования (рис. 7).

Индивидуальный план может быть распечатан по утвержденной

форме, при этом все виды времени и примерный объем будут заполнены соответствующими данными из документа (рис. 8).

Таким образом, использование разработанной системы позволит значительно сократить время согласования и утверждения индивидуальных планов преподавателей, избежать ошибок в интерпретации названий норм времени, автоматизировать подсчет часов, а также унифицировать печатную форму индивидуальных планов.

1.2. Учебно-методическая работа

№ п/п	Наименование вида работ	Примерный объем, ч	Срок выполнения	Отчет о выполнении
1	Переработка методических материалов по ранее читавшимся курсам на одного преподавателя в год на один час лекций	0,5	1 семестр	
2	Актуализация действующей учебно-методической документации по дисциплине	8	1 семестр	
3	Формирование фонда оценочных средств по дисциплине	15	1 семестр	
4	Актуализация информации в ЭИОС ВУЗа	1	1 семестр	
Итого:		24,5		

СОГЛАСОВАНО:

Методист УМУ _____ Колодкина Н. Н.

Начальник УМУ _____ Шлыкова Л. А.

Рис. 8. Печать индивидуального плана



Рис. 9. План проведения эксперимента

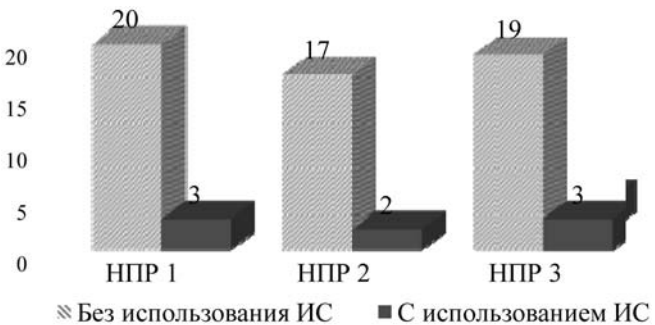


Рис. 10. Трудозатраты (в днях) этапа согласования и утверждения индивидуального плана НПР

2. Проведение научного эксперимента

В рамках научного исследования был проведен эксперимент, позволяющий определить, влияет ли внедрение информационной системы для формирования и согласования индивидуальных планов на изменение сроков и этапов согласования и утверждения планов в вузе. Полный план проведения эксперимента представлен на рис. 9.

В ходе эксперимента было рассчитано число этапов и поэтапный срок формирования и согласования индивидуального плана трех научно-педагогических работников в ручном режиме и с использованием информационной системы.

Результаты эксперимента представлены на рис. 10.

Итоговое значение трудозатрат на процесс согласования и формирования индивидуального плана всеми участниками эксперимента представлено в табл. 1.

Проанализировав табл. 1, можно сделать вывод, что в среднем число дней, необходимое для формирования и согласования индивидуального плана научно-педагогических работников, с использованием информационной системы снизится на 40 дней и составит 8 дней, в то время как при ручном режиме данный процесс составляет в среднем 48 дней.

Для подтверждения влияния внедрения информационной системы для формирования и согласования индивидуальных планов на изменение сроков и этапов согласования и утверждения планов в вузе проведем дисперсионный анализ.

Дисперсионный анализ применяется для исследования влияния одной или нескольких качественных переменных (факторов) на одну зависимую количественную переменную (отклик). Основной целью дисперсионного анализа является исследование значимости раз-

Таблица 1

Суммированное значение трудозатрат

Участник эксперимента	Без использования ИС	С использованием ИС
НПР 1	51 день	9 дней
НПР 2	45 дней	6 дней
НПР 3	48 дней	9 дней

личия между средними с помощью сравнения (анализа) дисперсий. Разделение общей дисперсии на несколько источников позволяет сравнить дисперсию, вызванную различием между группами, с дисперсией, вызванной внутригрупповой изменчивостью [12].

Общую среднюю можно получить как среднее арифметическое групповых средних:

$$\bar{x} = \frac{\sum \bar{x}_j}{p}. \quad (1)$$

Вначале рассчитывается общая сумма квадратов отклонений вариантов от общей средней:

$$S_{\text{общ}} = \sum \sum (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (2)$$

и факторная сумма квадратов отклонений групповых средних от общей средней, которая и характеризует влияние данного фактора:

$$S_f = q \sum (\bar{x}_j - \bar{x})^2. \quad (3)$$

Остаточная сумма квадратов отклонений получается как разность

$$S_{\text{ост}} = S_{\text{общ}} - S_f.$$

Для несмещенной факторной выборочной дисперсии используется следующая формула:

$$S_f^2 = \frac{S_f}{p-1},$$

где $p-1$ — число степеней свободы несмещенной факторной выборочной дисперсии.

В целях оценки влияния фактора на изменения рассматриваемого параметра рассчитывается следующая величина:

$$f_{\text{набл}} = \frac{S_f^2}{S_{\text{ост}}^2}.$$

Так как отношение двух выборочных дисперсий S_f^2 и $S_{\text{ост}}^2$ распределено по закону Фишера—Снедекора, то полученное значение $f_{\text{набл}}$ сравнивают со значением функции распределения в критической точке $f_{\text{кр}}$, соответствующей выбранному уровню значимости α .

Если $f_{\text{набл}} > f_{\text{кр}}$, то фактор оказывает существенное воздействие и его следует учитывать, в противном случае он оказывает незначительное влияние, которым можно пренебречь.

Для расчета $S_{\text{набл}}$ и S_f могут быть использованы также формулы:

$$S_{\text{общ}} = \sum x_{ij}^2 - \bar{x}^2; \quad (4)$$

$$S_f = q \sum \bar{x}_j^2 - \bar{x}^2. \quad (5)$$

Влияющим фактором является информационная система, используемая для формирования и согласования индивидуальных планов. Количественными переменными являются число дней длительности каждого этапа согласования индивидуального плана и общее число этапов процесса.

Для проведения анализа выбрано максимальное значение для каждого этапа, выявленное в процессе эксперимента.

Исходные данные для анализа представлены в табл. 2.

Число классов градации фактора (групп) $a = 2$ и в каждом классе (группе) $n_i = 4$ наблюдения. Общее число наблюдений $n = 8$.

Числа степеней свободы:

$$v_a = a - 1 = 2 - 1 = 1,$$

$$v_e = n - a = 8 - 2 = 6,$$

$$v = 8 - 1 = 8 - 1 = 7.$$

Суммы квадратов отклонений:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{n} = \frac{96}{8} = 12.$$

Для расчета $S_{\text{общ}}$ по формуле (4) составляем таблицу квадратов (табл. 3).

Таблица 2

Исходные данные для дисперсионного анализа

Наименование этапа	Без использования ИС	С внедрением ИС
1 этап. Утверждение и составление нагрузки	16 дней	4 дня
2 этап. Составление индивидуального плана, утверждение на кафедре и в институте	15 дней	2 дня
3 этап. Согласование и утверждение индивидуального плана НПП	20 дней	3 дня
Число этапов процесса	27	9

Таблица 3

Таблица квадратов

N	Π_1^2	Π_2^2
1	256	16
2	225	4
3	400	9
4	729	81
Σ	1610	110

$$S_{\text{общ}} = 1610 + 110 - 4 \cdot 2 \cdot 12^2 = 568.$$

Находим S_f по формуле (5):

$$S_f = 4 \cdot (19,5^2 + 4,5^2 - 2 \cdot 12^2) = 450.$$

Получаем $S_{\text{ост}}$:

$$S_{\text{ост}} = S_{\text{общ}} - S_f = 568 - 450 = 118.$$

Определяем факторную дисперсию:

$$S_f^2 = \frac{S_f}{p-1} = \frac{450}{2-1} = 450$$

и остаточную дисперсию:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}}{p(q-1)} = \frac{118}{2(4-1)} = 19,67.$$

Оценка факторной дисперсии больше оценки остаточной дисперсии, поэтому можно сразу утверждать несправедливость нулевой гипотезы о равенстве математических ожиданий по слоям выборки.

Иначе говоря, в данном примере фактор f оказывает существенное влияние на случайную величину.

Проверим нулевую гипотезу H_0 : равенство средних значений x . Находим $f_{\text{набл}}$:

$$f_{\text{набл}} = \frac{450}{19,67} = 22,88.$$

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$, чисел степеней свободы 1 и 6 находим $f_{\text{кр}}$ из таблицы распределения Фишера—Снедекора:

$$f_{\text{кр}}(0,05; 1; 6) = 5,99.$$

В связи с тем, что $f_{\text{набл}} > f_{\text{кр}}$, нулевую гипотезу о существенном влиянии фактора на результаты экспериментов принимаем (нулевую гипотезу о равенстве групповых средних отвергаем).

Другими словами, групповые средние в целом различаются значимо.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что внедрение информационной системы значительно повлияет на качество работы вуза.

В ходе эксперимента было выявлено, что с использованием информационной системы выполнение этапов бизнес-процесса формирования и

согласования индивидуальных планов снизится на 40 дней и составит 8 дней, в то время как при ручном режиме данный процесс составляет в среднем 48 дней. Дисперсионный анализ показал, что разработанная система позволит значительно сократить время на формирование и согласование индивидуального плана.

В ходе работы разработана система, позволяющая автоматизировать этапы формирования индивидуального плана, вводить актуальные нормы времени, автоматизировать процесс согласования индивидуального плана ответственными лицами, печатать индивидуальные планы по установленному образцу.

В ходе исследования была изучена предметная область, проанализирована деятельность научно-педагогических работников вуза. Более детально изучен документ "Индивидуальный план", формируемый научно-педагогическими работниками. Анализ процесса формирования документа "Индивидуальный план" показал, что данный процесс осуществляется вручную. Анализ существующих аналогов показал, что предлагаемые на рынке системы автоматизации деятельности вуза не позволяют в полной мере автоматизировать процесс формирования индивидуального плана.

В ходе исследования был проведен научный эксперимент, направленный на подтверждение эффективности разрабатываемой системы.

Для подтверждения влияния внедрения информационной системы для формирования и согласования индивидуальных планов на изменение сроков и этапов согласования и утверждения планов в вузе проведен дисперсионный анализ, который показал, что внедрение информационной системы значительно повлияет на качество и скорость работы научно-педагогических работников вуза.

Внедрение автоматизированной системы формирования и согласования индивидуальных планов в вузе будет эффективным и результативным в том случае, если обоснована необходимость внедрения автоматизированной системы управления и сокращается время формирования и согласования индивидуальных планов научно-педагогических работников.

В ходе проведенного исследования выявлено, что систем, позволяющих автоматизировать процесс формирования индивидуальных планов научно-педагогических работников, в настоящее время не разработано. Также как отсутствует система, позволяющая запустить процесс согласования индивидуальных планов в электронном виде.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный программный продукт позволяет организовать более эффективную работу сотрудников университета при разработке индивидуального плана, а также учебному управлению университета упростить работу, связанную с согласованием индивидуальных планов сотрудников.

Список литературы

1. Зуева С. В. Необходимость автоматизации управления ВУЗом // Инновационное развитие экономики. Будущее России. 2015. С. 170—174.
2. Шайдулов А. А. Проблемы автоматизации деятельности высшего учебного заведения // Новые информационные технологии в образовании. 2016. С. 198—202.
3. Верескун В. Д., Самсонов В. Л., Сухорукова О. Б. Автоматизация производственных процессов образовательного учреждения: об опыте внедрения программного комплекса "ИС Университет ПРОФ" // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2016. № 1. С. 78—85.
4. Генералов И. Г., Алексеева Л. А. Место "ИС:университет" среди информационных технологий // Вестник НГИЭИ. 2015. № 5 (48).
5. Ледовской М. И. Разработка подсистемы информационной системы "Кафедра" // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. № 11 (148).
6. Горбунов А. А., Исаев Е. А., Моргунов А. Ф. Решение на платформе 1С:Предприятие 8 для автоматизации деятельности преподавателя в высшем учебном заведении // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 5. С. 12—18.
7. Головина Е. Ю., Гаврикова Ю. В., Батршина З. Р. Автоматизация процесса учета и контроля деятельности

преподавателей кафедры // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 159—162.

8. Заботина Н. Н., Митрофанова Ю. В., Фетисова А. В. Автоматизация бизнес-процессов учета и контроля деятельности НПП вуза средствами 1С // Актуальные вопросы современной науки. 2013. С. 143—149.

9. Акимов А. А. Модуль автоматизации составления индивидуальных планов преподавателей информационно-аналитической системы мониторинга деятельности кафедры // Инновации в науке, экономике, образовании. 2012. С. 9—11.

10. Романова Л. М., Фролов А. Г. Компоненты профессиональной деятельности преподавателя вуза на должностных уровнях ассистента и старшего преподавателя // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2009. Т. 1. № 1.

11. Григораш О. В., Трубилин А. И. Инновации в организационно-методической работе на кафедре // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2013. № 91.

12. Бекарева Н. Д., Раскосова М. А. Статистическая обработка моделей дисперсионного анализа // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2012. № 4. С. 73—78.

13. Классов А. Б., Классова О. В. Автоматизация учебного процесса в структурных подразделениях вуза // Педагогический профессионализм в образовании. 2015. С. 72.

14. Покало Ю. Д., Киреева Н. А. Автоматизация документооборота на кафедре вуза // Аспирант. 2015. № 10. С. 183—185.

15. Резник С. Д., Вдовина О. А. Преподаватель вуза: технологии и организация деятельности. 2014.

16. Грекул В. И., Денищенко Г. Н., Коровкина Н. Л. Проектирование информационных систем: курс лекций: учебное пособие // Интернет-университет информационных технологий. 2005. Т. 298. № 5.

17. Зубренкова О. А., Зубенко Д. П., Чермухин А. Д. Разработка модуля "Анализ трудовых ресурсов" на платформе "1С: бухгалтерия 8" для использования в учебном процессе образовательного учреждения // Вестник НГИЭИ. 2016. № 2 (57).

T. N. Astakhova, Assistant Professor, e-mail: ctn_af@mail.ru,

V. V. Kosolapov, Assistant Professor, e-mail: vladimir.kosolapov@mail.ru,

A. A. Romanova, Senior Lecturer, e-mail: anya-romanova-07@yandex,

Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Nizhny Novgorod, Russian Federation,

T. M. Kondurtsova, Programmer, e-mail: koketka03.94@mail.ru

IP Akhverdyan G. G., Russian Federation

Development of an Information System for Automate the Process of Formation and Coordination of Individual Plans of Scientific and Pedagogical Workers

An important problem of creating an automated system for the formation of individual plans at the university departments is high resource consumption. To date, this problem is relevant, the solution of which will improve the effectiveness of teachers and the entire educational process as a whole. The paper describes the development of an information system for automating the process of formation and coordination of individual plans of scientific and pedagogical workers. A scientific experiment was conducted to determine whether the introduction of an information system for the formation and approval of individual plans affects the timing and stages of approval and approval of plans at a university.

Keywords: development, educational institution, university automation, information system, 1С:Enterprise, teacher activity automation

References

1. Zuyeva S. V. *Innovatsionnoye razvitiye ekonomiki. Budushcheye Rossii*, 2015, pp. 170–174 (in Russian).
2. Shaydurov A. A. *Novyye informatsionnyye tekhnologii v obrazovanii*, 2016, pp. 198–202 (in Russian).
3. Vereskun V. D., Samsonov V. L., Sukhorukova O. B. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta puty soobshcheniya*, 2016, no. 1, pp. 78–85 (in Russian).
4. Generalov I. G., Alekseyeva L. A. *Vestnik NGIEI*, 2015, No. 5 (48) (in Russian).
5. Ledovskoy M. I. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*, 2013, no. 11 (148) (in Russian).
6. Gorbunov A. A., Isayev Ye. A., Morgunov A. F. *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*, 2017, no. 5, pp. 12–18 (in Russian).
7. Golovina Ye. Yu., Gavrikova Yu. V., Batrshina Z. R. *Informatsionnyye tekhnologii. Problemy i resheniya*, 2017, no. 1, pp. 159–162 (in Russian).
8. Zabolotina N. N., Mitrofanova Yu. V., Fetisova A. V. *Aktual'nyye voprosy sovremennoy nauki*, 2013, pp. 143–149 (in Russian).
9. Akimov A. A. *Innovatsii v nauke, ekonomike, obrazovanii*, 2012, pp. 9–11 (in Russian).
10. Romanova L. M., Frolov A. G. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2009, T. 1, no. 1 (in Russian).
11. Grigorash O. V., Trubilin A. I. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 91 (in Russian).
12. Bekareva N. D., Raskosova M. A. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 73–78 (in Russian).
13. Klassov A. B., Klassova O. V. *Pedagogicheskiy professionalizm v obrazovanii*, 2015, 72 p. (in Russian).
14. Pokalo Yu. D., Kireyeva N. A. *Aspirant*, 2015, no. 10, pp. 183–185 (in Russian).
15. Reznik S. D., Vdovina O. A. *Prepodavatel' vuza: tekhnologii i organizatsiya deyatel'nosti. Uchebnik*, 2014 (in Russian).
16. Grekul V. I., Denishchenko G. N., Korovkina N. L. *Internet University of Information Technologies*, 2005, vol. 298, no. 5 (in Russian).
17. Zubrenkova O. A., Zubenko D. P., Cheremukhin A. D. *Vestnik NGIEI*, 2016, no. 2 (57) (in Russian).

20–22 октября 2020 года в Москве состоится

**Третья Международная научно-техническая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ СЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»
(MoNeTec- 2020)**

Председатель программного комитета:

Р. Л. Смелянский, чл.-корр. РАН, профессор, МГУ им. М. В. Ломоносов

Основные темы конференции

- Архитектура и протоколы для автоматизации управления сетями и оркестрации в облачных инфраструктурах
- Инновационные технологии для облаков, интернета, компьютерных сетей
- Новые парадигмы в организации и функционирования сетей, например, Intent Based Network, Information Centric Network, Content Centric Network т.п.
- Подходы, методы и средства для управления качеством сервиса и распределения ресурсов в сетях и облачных средах
- Применение больших данных и машинного обучения для повышения эффективности функционирования сетей, облачных платформ и управления ими
- Проблемы безопасности сетей и облачных платформ
- Применение сетевых облачных технологий к обработке больших данных, Интернета вещей, сетей беспроводной и мобильной связи
- Вопросы архитектуры программно-управляемого телекоммуникационного оборудования

Подробная информация о конференции, размещена на официальном сайте
<http://www.monetec.ru>

Адрес редакции:

107076, Москва, Стромнинский пер., 4

Телефон редакции журнала (499) 269-5510

E-mail: it@novtex.ru

Технический редактор Е. В. Конова.

Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 10.04.2020. Подписано в печать 08.05.2020. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 8,86. Заказ ИТ620. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15565 от 02 июня 2003 г.

Оригинал-макет ООО "Авансд солишнз". Отпечатано в ООО "Авансд солишнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Рисунки к статье Т. Н. Астаховой, В. В. Косолапова,
А. А. Романовой, Т. М. Кондурцовой

«РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И СОГЛАСОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПЛАНОВ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ»

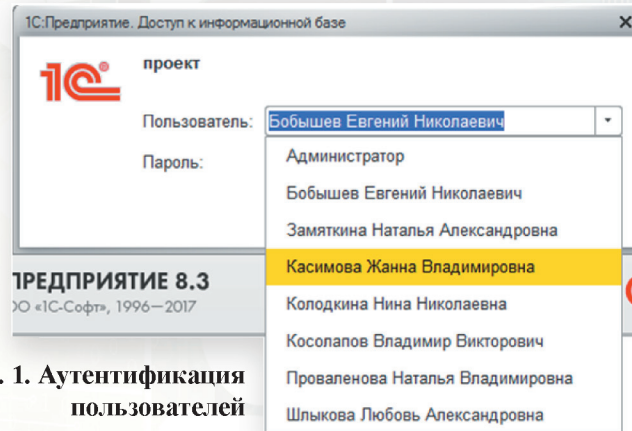


Рис. 1. Аутентификация
пользователей

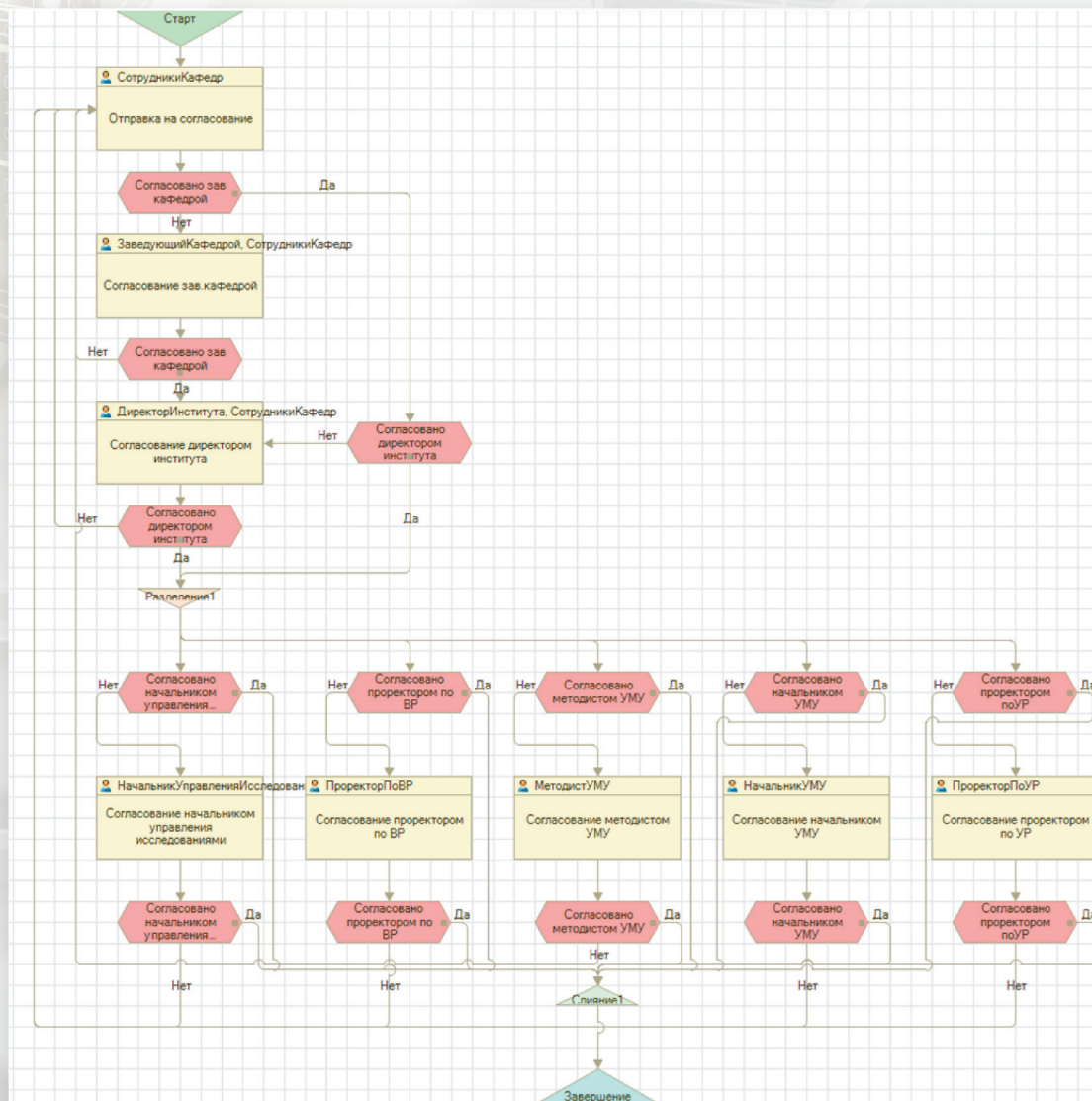


Рис. 5. Бизнес-процесс согласования индивидуального плана

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» выпускает научно-технические журналы



Ежемесячный теоретический
и прикладной научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

Подписной индекс по Объединенному каталогу
«Пресса России» – 72656



Научно-практический
и учебно-методический журнал

БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79963

Междисциплинарный
теоретический и прикладной
научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79493



Ежемесячный теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

В журнале освещаются достижения в области мехатроники, интегрирующей механику, электронику, автоматику и информатику в целях совершенствования технологий производства и создания техники новых поколений. Рассматриваются актуальные проблемы теории и практики автоматического и автоматизированного управления техническими объектами и технологическими процессами в промышленности, энергетике и на транспорте.

Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 79492

Теоретический
и прикладной
научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.



Подписной индекс по
Объединенному каталогу
«Пресса России» – 22765

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромьинский пер., 4. Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ".
Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10. E-mail: antonov@novtex.ru